



Tielaitos

Kimmo Tikka



Sorateiden ylläpidon ohjaus

Stokastisen mallin soveltamisesta
sorateiden kunnonmittauksiin ja
toimenpidesuunnitteluun

**Tielaitoksen
selvityksiä**

5/1990

Helsinki 1990

Tiehallitus

Tielaitoksen selvityksiä

5/1990

Kimmo Tikka

Sorateiden ylläpidon ohjaus

Stokastisen mallin soveltamisesta sorateiden
kunnonmittauksiin ja toimenpidesuunnitteluun

Tielaitos
Tiehallitus, Tuotanto-osasto

Helsinki 1990

ISSN 0788-3722
Valtion painatuskeskus
Pasilan VALTIMO
Helsinki 1990

Julkaisua saatavana:
Tiehallitus, Tuotannon kehittämisspalvelut

Tielaitos
Tiehallitus
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 1541

Tekijä ja työn nimi:

Kimmo Tikka:

Sorateiden ylläpidon ohjaus - Stokastisen mallin soveltamisesta sorateiden kunnonmittauksiin ja toimenpidesuunnitteluun

Päivämäärä: 2.10. 1990**Sivumäärä:** 77 + 38**Osasto:** Tietotekniikan osasto**Professuuri:** Mat - 2

Matematiikan ja systeemianalyysin laitos

Työn valvoja: Apul. prof. Sampo Ruuth**Työn ohjaaja:** Vs. apul. joht. Raimo Tapio, Tiehallitus

Tämän työn tarkoituksena on luoda perustaa soratieverkon verkkotason ylläpidon hallintajärjestelmälle. Ylläpidon hallintajärjestelmien avulla pyritään ennakoimaan tulevaa kehitystä, asettamaan ylläpitotavoitteet optimaalisesti ja kohdentamaan toimenpiteet sinne, missä niistä saadaan suurin hyöty. Hallintajärjestelmien osia ovat rappeutumismallit, kunnon arviointi, toimenpiteiden ja niiden vaikutusten määrittely sekä tienkäyttäjän kustannukset.

Suomessa oli sorateita vuoden 1989 lopussa n. 31 300 km (40 % tiestöstä). Liikennesuoritteesta sorateiden osuus oli 6 % ja kunnossapidon kustannuksista 16%.

Soratien kulutuskerroksen kuntoa kuvataan yleisimmin erilaisilla subjektiiviseen arvioon perustuvilla muuttujilla. Suomessa käytetään muuttujina pinnan tasaisuutta, kiinteyttä ja pölyävyyttä.

Soratien käyttäytymistä on tutkittu melko laajasti Pohjoismaiden ohella myös Maailman Pankin HDM-mallia muodostettaessa. HMD:n mallit perustuvat mitattuun IRI-lukuun.

Tämän tutkimuksen aikana soratien käyttäytymistä pyrittiin selvittämään n. 360 km mittaisen kotieverkon viikottaisella kunnon seurannalla. Mittausryhmä arvioi koeteiden kunnon 500 m:n osuuksissa ja mittasi sykäysmittarilla epätasaisuusluvun.

Mittausryhmän arvioiden ja tiemestareilta saatujen toimenpidetietojen perusteella pyrittiin regressioanalyysillä muodostamaan mallit soratien epätasaisuusluvulla mitatulle kunnon vaihtelulle ja toimenpiteen (tasaushöyläyksen) vaikutukselle. Myös kuntoarvioiden perusteella tutkittiin toimenpiteiden suoritusta ja onnistumista. Tutkimuksessa todettiin aiempia tutkimuksia pienempi korrelaatio mitatun ja arvioitun kunnon välillä. Höyläyksen vaikutus todettiin jopa tien mittattua kuntoa heikentäväksi mikäli höyläys suoritetaan keskimäärin alle 300 cm/km epätasaisuuden omaavalle tielle.

Työssä esitetään sorateiden ylläpidon optimointimallin rakenne sekä perusteet päällystettyjen teiden ylläpidon optimointiin tehdyn HIPS-ohjelmiston käytöstä myös sorateiden ylläpidon optimoinnissa. Esimerkkinä lasketaan kuntoarvioon perustuva optimointimalli höyläyksen (hoitotoimenpiteen) suorittamiselle.

Sisällysluettelo

Alkulause.....	v
1. Johdanto	1
2. Perustietoa sorateistä	2
2.1 Rakenne.....	2
2.1.1 Vauriot.....	3
2.1.2 Routiminen	4
2.2 Soratien ominaisuuksien kuvaaminen	4
2.2.1 Kuntomuuttujat	4
2.2.2 Rakennemuuttujat.....	5
2.2.3 Taustamuuttujat	6
2.3 Kunnossapitotoimenpiteet	7
3. Soratietutkimuksia	9
3.1 FUG-tutkimus.....	9
3.2 Highway Design and Maintenance Model.....	11
3.2.1 Rappeutuminen	13
3.2.2 Höyläyksen vaikutus.....	15
3.2.3 Vakiotilamallit.....	15
3.2.4 Kulutuskerroksen materiaalihävikki.....	17
3.2.5 Höyläystiheys dynaamisella optimoinnilla.....	17
3.2.6 Yhteenveto HDM-malleista.....	18
3.3 US Army Corps of Engineers.....	18
3.4 Muut.....	19
3.4.1 Kunnossapidon laatutasotutkimus.....	19
3.4.2 Piippo	19
3.4.3 OECD	20
4. Tiestön ylläpidon hallintajärjestelmät.....	21
4.1 Tiestön ylläpidon hallintajärjestelmien tavoitteet.....	21
4.2 Highway Investment Programming System (HIPS)	22

4.3	Ylläpitojärjestelmän mallityypin valinta	23
4.4	Semi-Markovin prosessi ja semimarkovilainen päätöksentekoprosessi	24
5.	Mittaustulosten analysointi	26
5.1	Yleistä	26
5.1.1	Koetieverkko	26
5.1.2	Mittausmenetelmät	27
5.1.3	Tulosten käsittely	28
5.2	Yhteenvedot mittauksista	28
5.2.1	VTT:n kuntoarviot	28
5.2.2	Toimenpiteet	29
5.2.3	Kulutuserrospaksuus	30
5.2.3	Suhteistus	32
5.2.4	Kevätkantavuuskerroin ja kantavuus	35
5.2.5	Routavauriot	36
5.2.6	Tiegeometria	38
5.2.7	Metsäisyysprosentti	39
5.2.8	Sateet	39
5.3	Soratien kulutuserroksen kunnon arviointi	40
5.3.1	Tiemestareiden kuntoarviot	41
5.3.2	Epätasaisuusluvun ja kuntoarvion vastaavuus	43
5.4	Toimenpiteen vaikutus	46
5.4.1	Tasaushöyläyksen lähtökynnys	46
5.4.2	Höyläyksen vaikutus	47
5.5	Epätasaisuusluvun analyysi	49
5.5.1	Höyläyksen vaikutus	49
5.5.2	Alin havaittu epätasaisuus	50
5.5.3	Kesän epätasaisuuskeskiarvo	51
5.5.4	Epätasaisuuskeskiarvo toimenpiteettömillä jaksoilla	52
5.6	Kulutuserrosmateriaalin hävikki	53
5.7	Mittausten arviointi	54
6.	Soratien mallit	56

6.1	Mallin taustamuuttujat	58
6.2	Kesähoidon optimointi	60
6.2.1	Tilat.....	60
6.2.2	Kustannukset.....	60
6.2.3	Siirtotodennäköisyydet.....	63
6.2.4	Optimointi	63
6.3	Kunnostustöiden optimointi	65
6.3.1	HIPS-ohjelmiston käyttö soratiemallissa	66
7.	Päätelmät	70
7.1	Tulosten arviointi	70
7.2	Suositukset tulevasta	71
	Lähdeluettelo	73
	Liitteet	1
	Liite A: Sorateiden kulutuskerroksen kuntoluokitus	
	Liite B: Semimarkovin prosessit	
	Liite C: HIPS-toimintakaavio	
	Liite D: Viikottaiset kuntoarviot	
	Liite E: Sateet vuosina 1988 ja 1989	
	Liite F: Tiemestareiden kunnonarviointi	
	Liite G: Hoidon optimointi 1989 LP-tehtävänä	
	Liite H: Tilastot osuuksittaisesta aineistosta	
	Liite I: Rakenneindeksi	

Alkulause

Tämä työ on tehty Tiehallituksessa tuotanto-osastolla. Työn valvojana toimi apul. prof. TkT Sampo Ruuth Teknillisestä Korkeakoulusta ja ohjaajana vs. apul. joht. DI Raimo Tapio Tiehallituksesta. Heille esitän kiitokseni asiantuntevasta ohjauksesta.

Erityisen kiitoksen ansaitsee väsymätön keskustelukumppanini tarkastaja Jorma Inkala Tiehallituksesta. Hänen innostava esimerkkinsä ja rauhallinen asioihin paneutumisensa auttoi voittamaan monia ongelmista. Sorateiden asiantuntijana hän on vailla vertaa.

Merkittävästi työni edistymiseen vaikuttivat myös FK Riitta Olsonen ja DI Pertti Virtala Tiehallituksesta sekä FK Vesa Männistö ja DI Juha Äijö Viasys Oy:stä. Heille lausun myös kiitokseni.

Mittavan työn tutkimusaineiston kokoamiseksi teki VTT:n tie- ja liikennelaboratorion mittausryhmä ja tärkeä oli myös koetieverkkoa hoitaneiden tiemestareiden osuus.

Ilman Kaisan, Katrin ja Juhon kannustusta olisi työni monesti ollut pelkkää puurtamista.

Espoossa 2.10.1990

Kimmo Tikka

1. Johdanto

Suomen 1960-luvulla rakennettu päätiestö on saavuttanut rakenteellisen kestoikänsä. Tiestön palvelutason säilyttäminen rajallisten kunnossapitoressurssien avulla on pakottanut luomaan uusia menetelmiä, joilla rahat ja toimenpiteet voidaan ohjata optimaalisesti. Tähän mennessä on saatu valmiiksi kestopäällysteteiden ylläpidon ohjauksen apuvälineiksi tarkoitettut HIPS (Higway Investment Programming System) ja PMS88 (Pavement Management System). Valmisteilla tai suunnitteilla ovat uusi versio PMS88- ohjelmistosta, kevytpäällysteteiden ottaminen mukaan HIPS-ohjelmistoon, siltojen (SIHA) ja hoidon (MMS) hallintajärjestelmät sekä hanke 1. tiemestaripiiritason soratien ylläpidon suunnittelujärjestelmä (SOHA).

Tämän työn tavoitteena on luoda perustaa sorateiden ylläpidon verkkotason hallintajärjestelmän vaatimalle optimointimallille.

Työn toisessa luvussa esitellään soratien rakenne, ominaisuudet, tilaa kuvaavat muuttujat ja tilan mittaamiseen käytetyt menetelmät sekä toimenpiteet, joilla tietä ylläpidetään. Kolmannessa luvussa käydään lyhyesti läpi tärkeimpien soratietutkimusten tuloksia. Neljännessä luvussa esitetään ylläpitojärjestelmien perusteet, kuvataan päällystettyjen teiden ylläpito-ohjelmisto HIPS ja sorateille kaavaillun mallin teoria. TVH:n toimeksiannosta on kesien 1988 ja 1989 aikana suoritettu koetieverkon kunnon seurantaa. Nämä mittaukset esitellään luvussa viisi. Samassa luvussa lasketaan myös mittauksiin perustuvat mallit soratien kuntotilalle. Kuudennessa luvussa lasketaan hoitomalli soveltaen koetieverkon mittaustuloksia ja kirjataan perusajatuksat HIPS-ohjelmiston soveltamiseksi sorateiden kunnostuksen optimointiin. Tutkimuksen ja tulosten arviointi on luvussa seitsemän.

2. Perustietoa sorateista

Tässä luvussa esitetään lyhyesti sorateiden rakenne, tien kunnon kuvaamiseen käytetyt muuttujat ja soratien ylläpidossa käytetyt toimenpiteet.

Vuoden 1989 lopussa yleisten teiden kokonaispituus oli 77044 km, josta sorateiden osuus oli 31259 kilometriä. Vuonna 1989 yleisten teiden kokonaisliikennesuorite oli 27148 miljoonaa ajoneuvokilometriä, josta sorateiden osuus oli 6 %. Samana vuonna tienpidon kustannukset olivat 5627 mmk. Kunnossapidon kustannukset olivat 2179 mmk (39 % tienpidon kustannuksista). Sorateita ylläpidettiin vuonna 1987 340 miljoonalla markalla ($= 119+87+24+110 =$ kunnostus + hoito + rakenteen parantaminen soratienä + rakenteen parantaminen ja päällystäminen, 16 % kunnossapidon kustannuksista) (Yleisten teiden kunnossapitotilasto 1989 ja Tielaitos 1990).

Vallitsevan näkemyksen mukaan on sorateiden osuus kunnossapitoon käytetyistä rahoista liikennesuoritteeseen nähden suuri. Soratien ylläpito maksaa ajoneuvokilometriä (suoritetta) kohden noin kaksi kertaa enemmän kuin yleinen tie keskimäärin.

Tien käyttäjän kustannukset sorateilla ovat noin 4-5% suuremmat kuin päällystetyillä teillä. Tien kunto vaikuttaa käyttäjän kustannuksiin jopa 30 % (Jóhannesson & al., 1984). Kunnossapidon laatutasotutkimuksen (TVH, 1985c) mukaan tien kunnon parantamisesta johtuvan tienkäyttäjän kustannusten säästö suhteessa tienpitäjän kustannusten lisäksi on keskimäärin 1.7.

2.1 Rakenne

Pääosa sorateista (92 %, TVH&Viatak, 1988) on rakentamattomia teitä, joilla tien kulutuskerros on tehty suoraan pohjamaan päälle ilman lisättyä rakennekerroksia.

Näinollen tyypilliseen soratiehen kuuluu yleensä kolme rakenneosaa: kulutuskerros, pohjamaa ja kuivatusjärjestelmä.

Kulutuskerroksen tehtävänä on muodostaa soratielle tasainen ja kiinteä pinta sekä parantaa tien kantavuutta.

Pohjamaan tärkein ominaisuus on sen laatu. Routivalla, epätasaisesti jäätyvällä maalla oleva tie ei säilytä muotoaan ja vaurioita joudutaan korjaamaan sekä routaantumisen että sulamisen edistyessä useita kertoja liikennöitävyyden takaamiseksi. Soratien kulutuskerroksen kannalta tärkeä pohjamaan ominaisuus on myös sopivan voimakas kapillaarinen imu, joka takaa kosteuden säilymisen kerroksessa.

Kuivatusjärjestelmään kuuluvat tienvarsiot, rummut ja laskuojat. Tienvarsioiden päätehtävä on tiealueelle satavien vesien pois johtaminen. Kuivatuksen tarkoituksena on myös parantaa tien kantavuutta ja vähentää routavaurioita. Liika kosteus pehmentää tien pintaa ja pohjamaahan jäänyt vesi aiheuttaa sulaessaan routavauriota.

Tienkäyttäjälle tärkein soratien osa on kulutuskerros. Kulutuskerroksen ominaisuudet määräävät tien ajettavuuden sekä tiegeometrian ohella myös ajokustannukset. Kulutuskerrosmateriaalina käytetään luonnon sorasta, kalliosta ja moreeneista jalostettuja murskeita. Suomessa ohjeellinen kerrospaksuus on 5 cm ja suurin raekoko 16 mm. Pinnan tiiviys ja materiaalien pysyminen kulutuskerroksessa varmistetaan materiaalin suhteistuksella eli eri raekokojen osuuksilla ja suolan käytöllä. Sadevesien poisvalumisen varmistamiseksi on tienpinnan sivukaltevuuden oltava riittävä (noin 5 astetta).

2.1.1 Vauriot

Kunnossapitotoimenpiteen käynnistäviä kulutuskerroksen vaurioita ovat pinnan i) tasaisuutta arvioitaessa reiät, purkaumat, aaltoilu, pitkittäis- ja poikittaissuuntaiset epätasaisuudet, väärä sivukaltevuus, routavauriot ja uranmuodostus, ii) kiinteyttä arvioitaessa irtosora, halkeamat ja pehmeä, märkä pinta sekä iii) pölyävyyttä arvioitaessa pöly (Jóhannesson & al., 1984).

2.1.2 Routiminen

Routivassa maassa routaantumisvaiheessa imeytyy jäätymiskohtaan alapuolisista kerroksista ylimääräistä vettä, joka jäätyy jäälinsiksi. Sulaessaan jäälinsit vapauttavat maaperään vettä, joka ei pääse valumaan normaalisti pois. Päältäpäin tuleva paine ajaa veden ylös maasta ja näin syntyy routapuhkeamia ja pehmeikköjä. Heitot ja painumat ovat routavaurioita paikoissa, joissa maa-aineksen routanousu routaantumisvaiheessa on erilaista (usein rumpujen kohdat) kuin ympäristössään.

2.2 Soratien ominaisuuksien kuvaaminen

Soratietä kuvaavat muuttujat voidaan ryhmitellä kolmeen luokkaan, jotka noudattavat käytössä olevaa jakoa hoito- ja kunnostustoimenpiteisiin: kuntomuuttujiin ja rakennemuuttujiin sekä taustamuuttujiin. Taustamuuttujien arvoihin ei kunnossapitotoimenpiteillä voida vaikuttaa. Kuntomuuttujat ovat luonteeltaan lyhytaikaista muutosta kuvaavia (päivä, viikko), kun taas rakennemuuttujien arvot vaihtelevat hitaammin (vuosi) (Viatak & al., 1988).

2.2.1 Kuntomuuttujat

Suomessa on vuodesta 1985 lähtien kuvattu soratien kulutuskerroksen kuntoa kuntoarvolla, joka koostuu kolmesta muuttujasta: tasaisuus, kiinteys ja pölyävyys. Tiemestari arvioi soratien kuntoa kilometreittäin kuvastandardin perusteella (TVH, 1986, Liite A). Standardissa on kuvattu viisi arvoa 1-5, joista 5 on paras. Kilometrin kuntoarvoksi tulee pienin kolmen muuttujan arvoista ja tien kuntoarvoksi keskiarvo kilometrin pätkien arvoista. Arvionti suoritetaan ohjeen mukaisesti 1-3 kertaa kuukaudessa. Toistaiseksi jatkokäsittelyä varten tallennetaan vain tiemestaripiirin kesän keskimääräinen kuntoarvo.

Mittaukseen perustuvaa tietoa soratien kunnosta on vaikeampi saada. Sopivia mittalaitteita ei ole käytössä lukuunottamatta pinnan tasaisuutta mittaavia kuten summaava sykäysmittari (l. 'pomppumittari') (Jóhannesson & al., 1984). Päälystettyjen teiden kunnan mittaamiseen on kehitetty laser- ja ultraäänimittareita. Näiden herkkien laitteiden soveltuvuus soratiemittauksiin on toistaiseksi kyseenalainen tulosten tulkintavaikeuksien takia.

Pomppumittarilla mitattu epätasaisuus ilmoitetaan yleensä yksikkönä cm/km (cm/km BI, joskus myös mm/km). Muita käytettyjä epätasaisuuden yksiköjä ovat sysäystä/km QI (Quarter-car Index) ja m/km IRI (International Roughness Index).

2.2.2 Rakennemuuttujat

Oleelliset kulutuskerroksen rakenteellista tilaa kuvaavat muuttujat ovat kulutuskerroksen paksuus ja kulutuskerrosmateriaalin laatu. Riittävä paksuus luo perustan hoitotoimenpiteiden onnistumiselle. Materiaalin laatu vaikuttaa kerroksen rappeutumisominaisuuksiin. Jos kulutuskerroksessa ei ole tarpeeksi hienoa ainesta, eivät kulutuskerroksen suuremmat hiukkaset kiinnity kerrokseen; jos taas hienoa ainesta on liikaa, on seurauksena pinnan hajoaminen veden paisuttaessa hienoa ainesta.

Kerrospaksuuden mittaaminen on käsityönä teknisesti helppo mutta aikaa vievä toimenpide. Rakentamattomilla teillä vaikeutena on, että kerroksen paksuus saattaa vaihdella huomattavasti. Automaattista, soratien kerrospaksuuden mittauslaitetta ei ole käytettävissä. Materiaalin raekokojen suhteet saadaan seulomalla soranäytteestä. Tämäkin tutkimus on varsin aikaa vievä ja kallis. Tiepiirit ovat osin inventoineet soratiestönsä kerrospaksuudet ja materiaalit.

Pintakerroksen alapuolisen rakenteen tilaa kuvaavien muuttujien tulisi kertoa jotain pohjamaan kantavuudesta ja routimisominaisuuksista sekä olla mitattavissa tai selkeästi arvioitavissa. Tierekisterin kantavuustiedot ovat sorateiden osalta puutteellisia ja mitatun tiedon arvo rakentamattomalla tiestöllä on kyseenalainen. Tierekisterin kantavuusarvo on tasavälein mitattujen pistekohtaisten kantavuusarvojen keskiarvo. Pistekohtainen kantavuusarvo voi kulutuskerroksen paksuuden tavoin vaihdella sekä pituus- että poikittaissuunnissa. Routimisominaisuuksia tierekisteritiedoista kuvaa lähinnä painorajoitustieto. Kantavuutta on sorateilla arvioitu kevätkantavuuskertoimen avulla. Kevätkantavuuskerroin kertoo miten suuri osuus kesäkantavuudesta on jäljellä routimisaikana. Käytetyt arvot ovat 0,8, 0,6 ja 0,4. Sanallinen selitys vastaaville luokille kuvaa tiepohjan käyttäytymistä: helposti kuivuva, kostea kantava ja pehmenevä. Näistä kostea kantava on edullisin pitää soratienä. Tällaisella tiellä kapillaari-imu ylläpitää kulutuskerroksen kosteutta. Routaantuessaan kostea kantava tie turpoo jossain määrin. Helposti kuivuvalla tiellä ei kapillaari-imu riitä pitämään kulutuskerrosta rittävän kosteana, toisaalta ei routimisongelmia juuri esiinny. Pehmenevällä tiellä kantavuusongelmat ovat yleisiä. Routavaurioista heittojen ja painumien määrä voidaan laskea kunhan sovitaan huomioitavan vaurion dimensioista. Pehmenneitten kohtien pinta-alat voidaan arvioida tai mitata.

Kuivatusjärjestelmän tilaa arvioidaan kuvastandardin avulla (TVH, 1985b). Standardissa on kuvattu kolmiluokkainen asteikko, jolla arvioidaan tien poikkileikkausta ja veden virtaamismahdollisuuksia tien reunassa ja sivuojassa.

2.2.3 Taustamuuttujat

Tärkeimmät soratien käyttäytymiseen vaikuttavista taustamuuttujista (olosuhdetekijöistä) arvioidaan olevan liikennemäärä, tien leveys, maantieteellinen alue, tien geometria sekä metsäisyys. Erittäin tärkeä tekijä on myös säätila, varsinkin sademäärä. Ylläpitojärjestelmissä tiestö jaetaan *liikennemääräluokkiin* (kesän-) keskimääräisen vuorokausiliikennemäärän [(K)KVL] mukaan. Jakamalla Suomi vyöhykkeisiin voidaan huomioida *alueellisia* eroja kuten talven pituus. *Geometria* vaikuttaa sorateilla toisaalta kulutuskerroksen kulumiseen sekä materiaalin kulkeutumiseen ja toisaalta ajoneuvojen nopeuksiin ja siten ajokustannuksiin. Yleisten teiden geometriaa on Suomessa mitattu järjestelmällisesti jo pitkään, mutta sorateiden osalta tiedon saatavuus on edelleen heikko. *Metsäisyyden* vaikutus perustuu siihen, että aukeilla paikoilla tuuli ja aurinko pääsevät kuivaamaan tien pintakerrosta ts. vettä haihtuu pinnalta enemmän kuin

kapillaari-ilmiö pystyy ylös kuljettamaan. Vaikutuksen suuruus kunnan heikkenemiseen on vielä epäselvä.

2.3 Kunnossapitotoimenpiteet

Soratien kunnossapito jaetaan *hoitoon* ja *kunnostukseen*. Hoitotoimenpiteillä pyritään pitämään tie tielain edellyttämällä tavalla liikennettä tyydyttävässä kunnossa ja kunnostuksen tarkoituksena on pitää kulutuskerros riittävän paksuna ja riittävästi hienoainesta sisältävänä, jotta hoitotoimenpiteet voidaan suorittaa, sekä varmistaa tien riittävä kantavuus.

Soratien hoidossa käytetyt toimenpiteet ovat muokkaushöyläys, pölynsidonta, tasaushöyläys, lanaus, lisäpölynsidonta ja reikien paikkaus sekä routavaurioiden korjaus. Sorateiden kunnossapidosta annetussa ohjeessa (TVH, 1985a) on määritelty tien liikennemäärän (hoitoluokan) mukaiset tavoite- ja toimenpiderajat (kuntoarvo) sekä toimenpideaika, jonka kuluessa on toimenpiderajan saavuttaneelle tielle tehtävä hoitotoimenpide. (Taulukko 1).

Taulukko 1. Hoitoluokat, tavoitekunto sekä toimenpiderajat ja -ajat (TVH,1985a).

Hoitoluokka	KKVL-raja	Tavoitekunto	Toimenpideraja	Toimenpideaika
I	> 200	3.4	2.5	1 - 4 vrk
II	< 200	2.8	2.0	1 - 6 vrk

Muokkaushöyläyksen tarkoituksena on palauttaa tien oikea poikkileikkausmuoto. Muokkaushöyläyksessä tien pinta irrotetaan tiehöylällä ja kulutuskerros sekoitetaan pölynsidonta-aineen tai sideaineen kanssa. Muokkaushöyläys tehdään yleensä kerran vuodessa keväällä, jolloin pyrkimyksenä on saattaa tie mahdollisimman hyvään kuntoon. Olennaista muokkaushöyläyksen onnistumiselle on oikea ajoitus, jolla taataan sopivan kosteuden säilyminen kulutuskerroksessa. *Tasaushöyläyksen* tarkoituksena on tasoittaa tien pinnan epätasaisuudet tien oikea muoto säilyttäen. Tasaushöyläyksessä tien kulutuskerros irrotetaan tiehöylällä kuoppien pohjia myöten. Tasaushöyläystä voidaan suorittaa koko sulan kauden ajan. Sekä muokkaus- että tasaushöyläyksen jälkeen tien pintaa voidaan tiivistää sopivalla laitteella. Lopullisen tiiveytensä tie saavuttaa vasta muutaman päivän kuluttua. Kesän aikana tehtävän tasaushöyläyksen onnistumisen edellytyksenä on kulutuskerroksen riittävä kosteus. *Lanausta* käytetään pinnan pienten

epätasaisuuksien tasoittamiseen ja kulutuskerroksen massojen sekoittamiseen. Kelirikkoaikana lanaamalla voidaan edistää tien pinnan kuivumista. Varsinaiseksi tien tasaamistoimenpiteeksi ei lanaamista suositella. *Pölynsidontan* tarkoituksena on sitoa kulutuskerroksen hienoaines ja estää tien pölyäminen. Pölynsidontaan käytettävä kalsiumkloridi sekoitetaan pinnan muokkaamisen yhteydessä kulutuskerrokseen. Kesän kuluessa voidaan joutua suorittamaan *lisäpölynsidontaa*. Muita käytettyjä toimenpiteitä ovat mm. *reikien paikkaus*. Tehdyn toimenpiteen pitäisi periaatteessa palauttaa tie kuntoarvoon viisi.

Rakennemuuttujien arvoon vaikuttavia kunnostustoimenpiteitä ovat syys- tai kevätsorastuksen tapahtuva kulutuskerroksen vahvistaminen, sidemaan lisäys, rakenteen tilaan vaikuttavat vauriokohtien korjaaminen ja rakenteen parantaminen sekä kuivatusjärjestelmän kunnostus.

Sorastuksilla on tarkoituksena korvata kulutuskerroksen materiaalihävikki ja pitää kerros riittävän paksuna, jotta tasaushöyläys olisi mahdollista suorittaa sekoittamatta kerroksia. Kulutuskerrosmateriaalia voi hävitä pölyämällä, ojiin kulkeutumalla ja tien runkoon (pohjamaahan) sekoittumalla. Rakennetta voidaan parantaa paikallisesti kuitukankaalla ja sen päälle levitettävällä murske- ja kulutuskerroksella. Varsinainen rakenteen parantaminen tehdään mursketta lisäämällä suunnitteluohjeitten mukaan. Koska rakennekerroksia lisättäessä tien kapillaarisuus tavallisesti samalla katkeaa. Rakenteen parantamista ei kannata tehdä päällystämättä tietä samalla, mikäli tien toiminnallinen luokka ja liikennemäärä edellyttävät päällystämistä. *Sidemaan lisäyksellä* pyritään palauttamaan kulutuskerrosmateriaalin suhteisuus ohjekäyrien mukaiseksi. *Kuivatusjärjestelmän kunnostuksella* poistetaan veden virtaamisesteet tien laidoilta ja sivuojista. Yleensä kunnostuksen yhteydessä myös palautetaan palteeseen ja ojaan kertynyt kulutuskerrosmateriaali tielle sekä korjataan tien leveys.

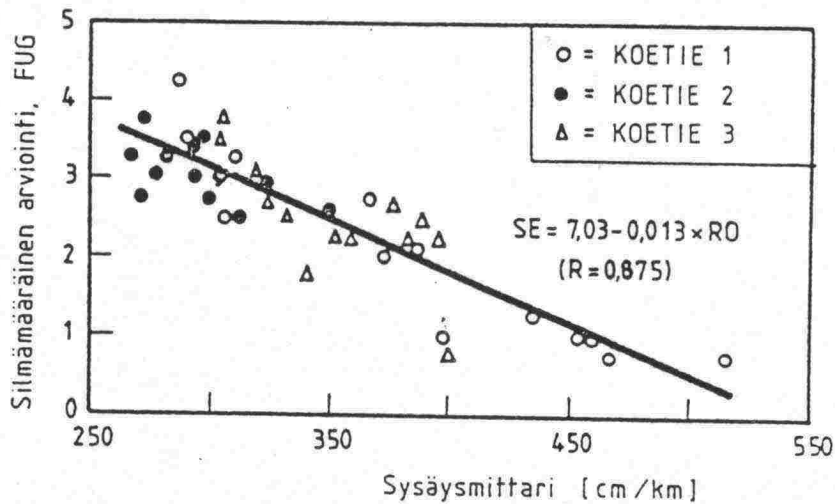
3. Soratietutkimuksia

Sorateiden käyttäytymistä on tutkittu viime vuosina varsin laajasti. Sorateiden kunnan mittaamista ja kunnossapitoa on aiemmin tutkittu yhteispohjoismaisessa FUG-projektissa (Förbättring och Underhåll av Grusvägar, Jóhannesson *&al.*, 1984). Maailmanpankki on vuodesta 1969 lähtien kehittänyt mallia teiden suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon (Paterson *&al.*, 1987, HDM III). Alfelori ja McNeil (1989) etsivät optimaalista höyläystiheyttä dynaamisella ohjelmoinnilla. Yhdysvaltain armeija (US Army Corps of Engineers, Eaton, 1988) on kehittänyt menetelmää päällystämättömien teiden kunnan arviointiin. TVH:n kunnossapitotoimiston toimeksiannosta tehtiin 1982-85 kunnossapidon laatutasotutkimus (TVH, 1985c), jossa tavoitteena oli hankkia tietoa hoitotasotavoitteiden ja standardien asettamista varten. Sorateiden ylläpitoa Lapin tiepiirin alueella tutki H. Piippo diplomityössään (1985).

3.1 FUG-tutkimus

Fug-tutkimuksen (Jóhannesson *&al.*, 1984) tarkoituksena oli pohjoismaisena yhteistyönä analysoida ja kehittää sorateiden kunnossapitoa ja parantamista. Tutkimuksen yhteydessä tehtiin kirjallisuusselvityksiä, suoritettiin koeajoja ja haastateltiin tienpitäjiä.

Tutkimuksen loppuraportissa esitellään tasaisuuden-mittauksessa käytettäviä laitteita, joita voidaan käyttää myös sorateilla. FUG-tutkimuksen kolmella suomalaisella koetiellä saatiin varsin hyvä korrelaatio ($r=0.875$) sysäys- (pomppu-) mittarilla mitatun ja silmämääräisen arvion välillä. Tutkimuksessa selitettiin sysäysmittarin tuloksella silmämääräistä arviota. Arvion perusteita ei ole loppuraportissa annettu. Käytetty luku lienee koetien kilometrin mittaisten osuuksien keskiarvo.



Kuva 1. Silmämääräisen arvioinnin ja epätasaisuusluvun välinen riippuvuus kolmella suomalaisella FUG-koetiellä (Jóhannesson & al., 1984).

Muutamilla koeteillä tutkittiin tarvetta kunnossapitotoimenpiteeseen. Höyläystiheys määritettiin sademäärän ja ajoneuvojen ylityskertojen mukaan.

Tutkimuksessa arvioitiin myös ajokustannuksia sorateillä. Tulosten mukaan polttoaineen kulutuksen ero kovan ja tasaisen sekä märän ja pehmeän pinnan välillä voi olla jopa 30%. Tutkimus mainitsee ruotsalaisissa mittauksissa todetun kestopäällysteen ja kuivan, kiinteän sorapinnan välisen polttoaineen kulutuseron olevan vain 1-2%. Tutkimuksessa todettiin polttoaineen kulutukseen vaikuttavan pinnan kiinteyden tasaisuutta enemmän.

Raportissa esitetään myös eri Pohjoismaissa käytetyt sorakulutuserroksen kunnon arvioimisperusteet ja annetaan suositus kolmiportaiseksi asteikoksi:

Hyvä: Tien pinnalla on tarvittava sivukaltevuus ja se on tasainen ja kiinteä. Yksittäisiä kuoppia voi olla. Ei pölyn muodostusta. Pinnan laatu ei vaikuta ajonopeuteen.

Hyväksyttävä: Tien pinnassa on enimmäkseen tarpeellinen sivukaltevuus ja se on enimmiltä osin tasainen ja kiinteä. Tie pölyää jonkin verran. Kuoppia ja epätasaisuuksia esiintyy joillakin osuuksilla. Näiden määrä ja laatu on kuitenkin sellainen, etteivät ne hidasta nopeutta kuin tietyissä tilanteissa kuten kohtaamisissa ja ohituksissa.

Epätyydyttävä tai huono: Tien sivukaltevuus on huono ja/tai se on sivusuunnassa deformeroinut. Suuri osa pinnasta on epätasainen, sillä on kuoppia ja aaltoisuutta.

Vaurioiden laatu ja määrä vaativat huomattavaa nopeuden alentamista. Tie pölyää voimakkaasti.

Lopuksi tutkimuksessa todetaan, että optimaalinen standardi (tienpitäjän ja tienkäyttäjän kulujen summan minimoiva kunnossapitotaso) voidaan periaatteessa ratkaista. Edellytyksenä on kuitenkin, että tunnetaan muun muassa kunnossapitokustannukset, tien kunnon muutokset kunnossapitotoimenpiteen jälkeen (, josta raportti ei anna arviota) ja ajoneuvokustannukset tien standardin funktiona. Yleisen optimistandardin esittämisen todetaan olevan käytännössä mahdotonta, mutta että yksittäisille teille voidaan tällainen standardi laskea, jos tunnetaan edellämainittujen tekijöiden lisäksi vielä yksikköhinnat. Yhteenvetona tutkimuksessa todetaan, että

lisätutkimusta tarvitaan (sora-) teiden rikkoutumis-mekanismeista ja kunnon kehityksestä kunnossapitotoimenpiteen jälkeen sekä yhteyksistä kunnon tai standardin ja ajoneuvokustannusten kesken.

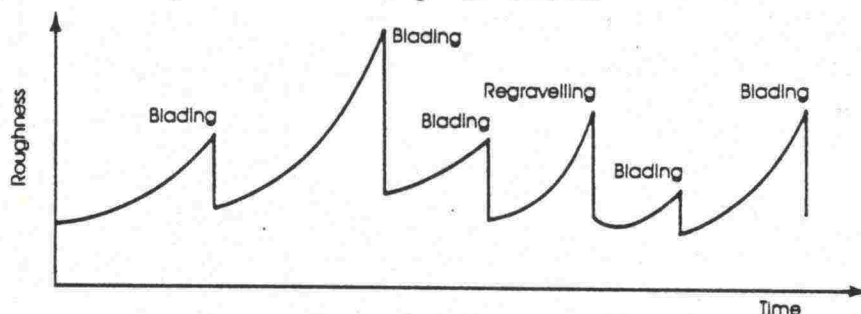
3.2 Highway Design and Maintenance Model

Highway Design and Maintenance Model (HDM-III) (Paterson *& al.*, 1989) on Maailman Pankin teettämä tiestön rakentamisen ja ylläpidon suunnittelujärjestelmä. HDM-III-ohjelmistolla voidaan monipuolisesti laskea tiehankkeiden kannattavuutta.

HDM-III-mallien (Paterson *& al.*, 1987) pohjana on laaja, useissa maissa tehty tutkimus. Päällystämättömien teiden mallit perustuvat pääosin Brasialiassa tehdyn tutkimuksen (GEIPOT, 1982) aineistoon.

Paterson toteaa soratietä rappeuttavien tekijöiden olevan 1) ympäristön ja liikenteen vaikutus pintaeroosioon, 2) liikenteen aiheuttama pinnan kuluminen ja hajoaminen, jotka johtavat urautumiseen ja materiaalien häviämiseen sekä 3) reikien syntyminen liikenteen ja tienpinnalla olevan veden vuoksi. Patersonin lähtökohtana on niin sanottu sahalaita-ajattelu, jossa tien kunto heikkenee ajan myötä ja toimenpide (höyläys) parantaa kuntoa:

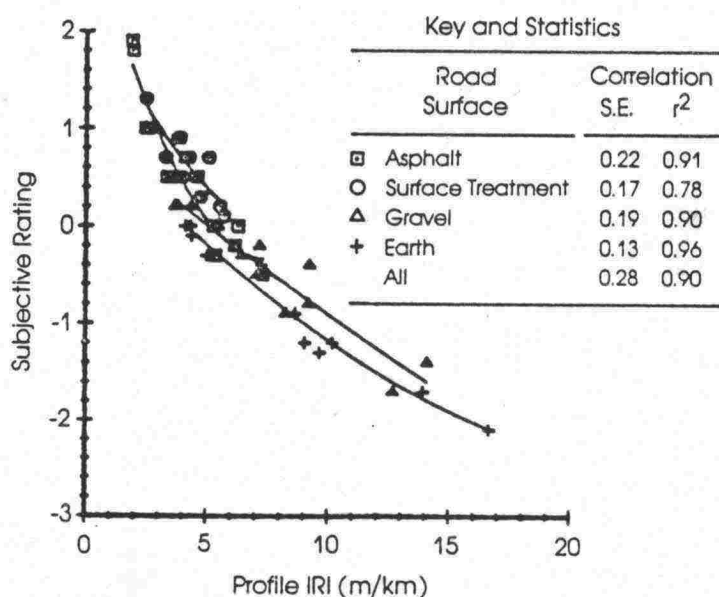
(a) Trend of Roughness under Blading Maintenance



Kuva 2. Tien kuntomuutosten Sahalaita-ajattelu (Paterson, 1987).

HDM-III:n mallit on rakennettu roudattomien kehitysmaiden oloihin, jotka poikkeavat Suomen oloista. Brasilian aineisto on kerätty alueelta, jolla sademäärän vaihteluväli oli 1506-1746 mm/vuosi. Koeteiden leveys, kulutuskerrosmateriaali ja normaali epätasaisuus poikkeavat selvästi Suomen olosuhteista. HDM:n soveltamista on tästä huolimatta tutkittu muun muassa Islannissa ja Kanadassa.

Samoin kuin FUG-tutkimuksessa HDM:n yhteydessä on saatu varsin hyvä korrelaatio arvioidun ja mitatun tien kunnon välille.



Kuva 3. Subjektiiivisen arvion ja mitatun IRI-arvon vastaavuus (Paterson, 1987).

Paterson esittää Brasilian havaintojen pohjalta estimoidut mallit epätasaisuuden lisääntymiselle (rappeutumiselle), höyläyksen vaikutukselle, vakiohoidolla (säännöllisellä höyläksellä) saavutettavalle keskimääräiselle epätasaisuudelle ja näihin liittyen saavutettaville minimi- ja maksimi epätasaisuuksille sekä kulutuskerroksen materiaalihävikille.

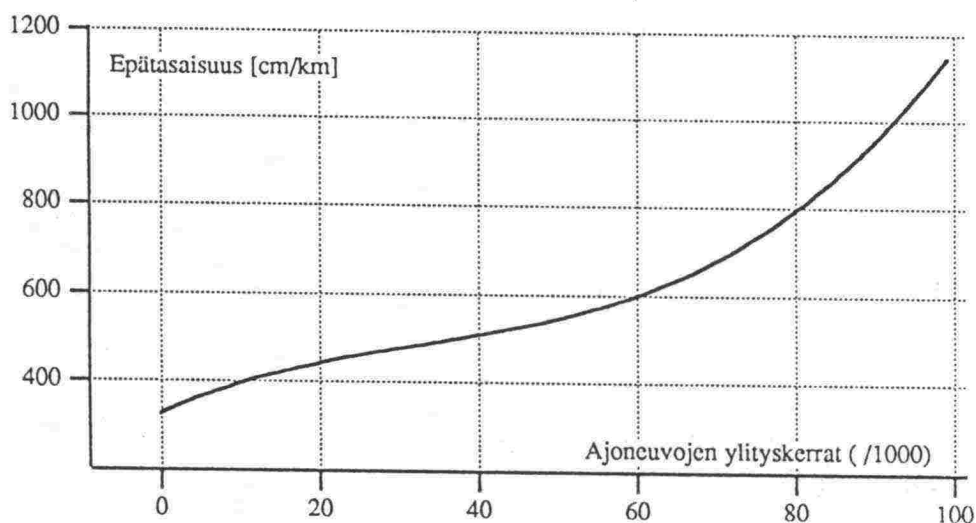
Paterson (1987) käyttää kaavoissaan 0.075 mm seulaa (P075). Suomessa on käytössä 0.074 mm:n seula. Kyseessä lieenee kuitenkin sama seulakoko ja ero johtunee yksikkömuunnoksessa eritavalla tehdystä pyöristyksestä. Jatkossa käytetään kuitenkin Patersonin kaavojen yhteydessä seulakokona 0.075 mm:ä ja merkintää P075.

3.2.1 Rappeutuminen

Rappeutumiselle (epätasaisuuden lisääntymiselle) on kirjassa esitetty useita erilaisia funktioita. Keniassa tehdyssä tutkimuksessa (Hodges & al., 1975) esitetään epätasaisuudelle kumulatiivisen liikennemäärän suhteen kolmannen asteen yhtälö:

$$RBI = 3250 + 84 T - 1.6 T^2 + 0.016 T^3, \quad (1)$$

jossa RBI = epätasaisuus mm/km pommumittarilla mitaten ja T = kumulatiivinen liikennemäärä edellisestä höyläyksestä lukien tuhansina ajoneuvoina.



Kuva 4. Hodgesin (1975) estimoima soratien epätasaisuuden lisääntyminen kumulatiivisen liikennemäärän funktiona.

GEIPOT (1982) tutkimuksessa esitetään logit-malli ($R^2 = 0.31$):

$$\begin{aligned} LDQ = & D (0.376 - 0.191 TE + 0.000320 ADL + 0.001014 ADH) \\ & + CP (-0.16 - 0.0354 G + 0.00883 P075 - 0.0218 PI). \end{aligned} \quad (2)$$

LDQ	$\ln (RG(t_2) / RG(t_1))$, jossa $RG(t_i)$ on epätasaisuus hetkellä i yksikkönä [sysäystä/km QI]
D	aika $t_2 - t_1$ satoina päivinä
TE	pintamateriaali-dummymuuttuja: TE = 1 'maateille' ja 0 muille
ADL	keskimääräinen kevyiden ajoneuvojen vuorokausiliikennemäärä (KVL) sekä ADH raskaitten ajoneuvojen liikennemäärä
G	tien kaltevuus asteina
P075	0.075 mm seulan läpäisy-%
PI	plastisuus-indeksi ja
CP	kumulatiivinen sademäärä [m] edellisestä höyläyksestä.

Pyrkiessään eliminoidaan GEIPOT-mallin pyrkimystä epätasaisuuden yliarvioimiseen estimoi Paterson höyläysvälin keskimääräistä epätasaisuutta mallilla ($R^2 = 0.76$):

$$\begin{aligned} \ln RGM = & 1.607 + 0.605 \ln RG_0 + 0.174 TQ + DB (0.000393 ADL + 0.00119 \\ & ADH) \\ & + MP (0.370 - 0.069 G - 0.0567 PI + 0.00855 P075). \end{aligned} \quad (3)$$

RGM	höyläysten välisen jakson keskimääräinen epätasaisuus [sysäystä/km QI]
RG_0	epätasaisuus höyläyksen jälkeen (jakson alkaessa)
DB	höyläysväli satoja päiviä
MP	keskimääräinen sademäärä jaksolla [m / kk]
TQ	dummy-muuttuja: TQ=1 kvartsiittisoralle ja 0 muille
muut kuten edellisessä kaavassa.	

3.2.2 Höyläyksen vaikutus

GEIPOT-tutkimuksessa annetaan höyläyksen vaikutukselle eksponentti-muotoinen kaava $RG_a = \alpha RG_b^\beta$, joissa RG_a ja RG_b ovat epätasaisuus ennen ja jälkeen höyläyksen (sysäystä/km QI) sekä α on olosuhteista riippuva kerroin. Kaavassa α on funktio tien materiaalien ominaisuuksista ja liikennemääristä. Eksponentti β saa arvon 0.63 ($R^2 = 0.61$). Toisessa, GEIPOT-tutkimuksen jälkeen estimoidussa kaavassa α on funktio sademäärästä ja karkean aineksen (raekoko > 25mm) osuudesta ja β sai arvon 0.771 ($R^2 = 0.65$). Paterson toteaa materiaalien ominaisuuksien ja liikennemäärien puuttumisen jälkimmäisestä mallista osoittavan, että höylääjän suorituksella on suurin vaikutus höyläyksen lopputulokseen.

3.2.3 Vakiotilamallit

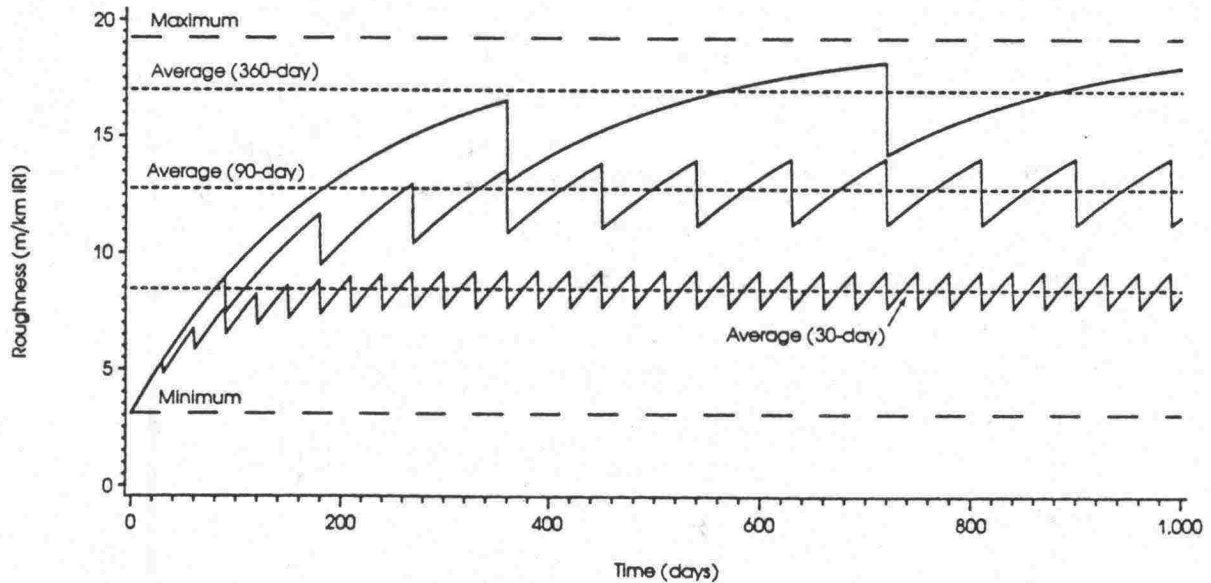
Paterson esittää yhdessä T. Watanatadan kanssa kehittämänsä mallit säännöllisen höyläyksen alaisen tien epätasaisuudelle ja höyläyksen vaikutukselle (Paterson, 1987). Mallit perustuvat oletukseen, että ulkoisten tekijöiden pysyessä muuttumattomina (tosin jaksollisina) saavuttaa myös tien epätasaisuus jaksollisen sykkeen ja jaksojen epätasaisuuskeskiarvot vakiintuvat tietylle tasolle. Tehden eräitä yksinkertaistavia oletuksia Paterson ja Watanatada johtavat suljetussa muodossa tien vakiotilaa kuvaavat kaavat.

Paterson ja Watanatada olettavat, että tien epätasaisuus RG vaihtelee kahden sademäärästä, tien geometriasta ja materiaaleista riippuvan rajan RG_{\min} ja RG_{\max} välillä. Kahden höyläyksen väliselle tien kunnon heikkenemiselle he estimoivat kaavan:

$$RG(t_2) = RG_{\max} - p [RG_{\max} - RG(t_1)], \quad (4)$$

jossa $RG(t_1)$ ja $RG(t_2)$ ovat tien epätasaisuus hetkillä t_1 ja t_2 viimeisimmästä höyläyksestä lukien [m/km IRI] ja $p = \exp[-0.001 (0.461 + 0.0174 ADL + 0.0114 ADH - 0.0287 ADT MMP) (t_2 - t_1)]$. Mallin selitysaste R^2 on varsin korkea 0.87.

Mallissa ADL, ADH, ADT ovat keskimääräiset vuorokausiliikennemäärät (AD) kevyille (L) ja raskaille (H) ajoneuvoille sekä yhteensä (T). MMP on keskimääräinen kuukauden sademäärä.



Kuva 5. Tien epätasaisuus vakio höyläystaajuuksella (Paterson 1987).

Höyläyksen vaikutukselle Paterson ja Watanatada esittävät kaavan

$$RG(t_a) = RG_{\min} + q [RG_b - RG_{\min}], \quad (5)$$

jossa RG_b ja RG_a ovat epätasaisuudet ennen ja jälkeen höyläyksen [m/km IRI] ja $q = 0.553 + 0.230 \text{ MGD}$. MGD on kulutuserrosmateriaalin dustratio eli seulojen P075 ja P425 läpäisyprosenttien suhde.

Maksimiepätasaisuus riippuu Patersonin mukaan tien geometriasta ja kulutuserroksen ominaisuuksista. Estimoitu maksimin kaava on

$$RG_{\max} = \max[21.4 - 32.4 (0.5 - \text{MGD}_j)^2 + 0.97 \text{ KCV} - 7.64 \text{ G MMP}; 12]. \quad (6)$$

Minimille Paterson antaa kaavan

$$RG_{\min} = \max\{0.8; \min[8; 0.361 \text{ D95} (1 - 2.78 \text{ MG}')]\}, \quad (7)$$

jossa $\text{MG}' = \min[\text{MG}, 0.36]$.

G	keskimääräinen mäkisyys (Paterson [%])
KCV	keskimääräinen kaarteisuus
MMP	keskimääräinen kuukauden sademäärä (Paterson [m/kk])
D95	maksimiraekoko [mm]

MGD	material gradation dustratio, suhde P075/P425; kuvaa materiaalin hienon aineksen suhteistusta
MG	min (MGM, 1-MGM), jossa $MGM = (MG075 + MG425 + MG02) / 3$
MG075	$\ln (P075/95) / \ln(0.075/D95)$, jos $D95 > 0.4$, muulloin 0.3
MG425	$\ln (P425/95) / \ln(0.425/D95)$, jos $D95 > 1.0$, muulloin 0.3
MG02	$\ln (P02/95) / \ln(2.0/D95)$, jos $D95 > 4.0$, muulloin MG425.

3.2.4 Kulutuskerroksen materiaalihävikki

Kulutuserrosta Paterson toteaa häviävän pääasiassa sään, liikenteen ja höyläyksen vaikutuksesta. Hävikkiin vaikuttavat myös materiaalien ominaisuudet, tien geometria ja leveys. Hävikille MLA Paterson esittää kaavan

$$MLA = 3.65 [3.46 + 2.46 MMP G + KT ADT], \quad (8)$$

jossa MLA on materiaalihävikki [mm/vuosi] ja

$KT = \max[0; (0.022 + 0.9669 KCV + 0.00342 MMP P075 - 0.0092 MMP PI - 0.101 MMP)]$. KT kuvaa liikenteen aiheuttamaa materiaalin kulkeutumista pois tieltä. Mallilleen Paterson antaa selityssasteen $R^2 = 0.31$.

G	keskimääräinen mäkisyys [%]
KCV	keskimääräinen kaarteisuus
MMP	keskimääräinen kuukauden sademäärä [m/kk]
P075	seulan 0.075 mm läpäisy-prosentti
PI	Plastisuus-indeksi [%]

3.2.5 Höyläystiheys dynaamisella optimoinnilla

Alfelor ja McNeil (1989) muotoilivat optimaalisen höyläystiheyden ratkaisemisen dynaamisen optimoinnin ongelmana. Tässä työssään he käyttivät Tsunokawan (1986) tapaa approksimoida tien epäjatkovaa käyttäytymistä jatkuvalla funktiolla. Ratkaisua he hakevat optimisäättö-tehtävänä, jonka Hamiltonin funktioksi he asettivat $H[t, x(t), u(t), \Omega(t)] = f(t, x, u) + \Omega^* g(t, x, u)$. Funktio f on minimoitavat kokonaiskustannukset, x on tien kunto, u on ohjausmuuttuja eli tien hoitostrategia (höyläystiheys) ja Ω liiottola. Lisäksi on vielä $x'(t) = g(t, x, u)$.

Laskemassaan esimerkissä Alfelori ja McNeil käyttävät edellä esitettyjä brasialaisesta aineistosta estimoituja tien kuntomalleja, Karibian alueella tutkittuja kustannuksia ja Etelä-Afrikassa mitattua höyläyssuoritetta. Päätelmissään he toteavat lähestymistapansa edut, mutta kaipaavat tienkäyttäjytymistä paremmin kuvaavia ja optimoinnin kannalta helpomman muotoisia malleja.

3.2.6 Yhteenveto HDM-malleista

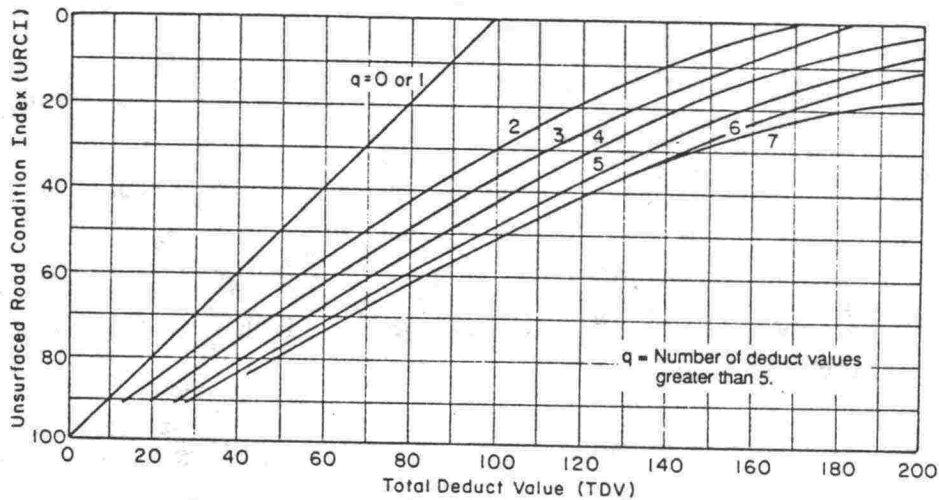
HDM:n mallit on tehty vastaamaan kehitysmaiden olosuhteita. HDM-järjestemää hyvin tunteva voi ohjelmiston parametrisointeja käyttäen soveltaa sitä myös muunlaisiin olosuhteisiin.

Rappeutumista kuvaavissa malleissa on annettu yhteys kulutuskerroksen materiaalien suhteistuksen ja muiden ominaisuuksien ja epätasaisuusluvun välille. Kulutuskerroksen paksuuden kulumista mitataan mm/vuosi-yksiköillä. Kulumisen kaavassa ei ole mukana tielle suoritettuja hoitotoimenpiteitä (höyläys) vaikka Paterson mainitseekin höyläyksen yhtenä tärkeimmistä kulumiseen vaikuttavista tekijöistä. Tutkimuksessa ei oteta kantaa kulutuskerroksen laadun muutoksiin, vaikka suhteistus on useimmissa kaavoissa varsin keskeinen muuttuja.

HDM-mallien ja Alfelorin-McNeilin mallin suljetussa muodossa esitetty sorateiden rappeutuminen auttaa ymmärtämään ilmiön vaikutussuhteita. Varsinkin Alfelorin-McNeilin työn jatkokehittely saattaisi olla antoisaa.

3.3 US Army Corps of Engineers

Eaton on kehittänyt U.S.A:n armeijalle päällystämättömien teiden kunnonseuranta systeemin. Järjestelmässä arvioidaan hoitotarpeen kannalta homogeenisia osuuksia määräväleihin. Arvioinnissa tutkitaan seitsemän vauriotyyppiä: 1) puutteellinen poikkileikkausmuoto, 2) kuivatusjärjestelmän puutteet, 3) aaltoilu, 4) pöly, 5) reiät, 6) urautuminen ja 7) sidosaineen häviäminen. Järjestys on asiantuntijaraadin antaman tuloksen mukainen. Kunkin tekijän arvoon q vaikuttavat vaurion vakavuus ja laajuus. Arvo q saadaan tekijäkohtaisista arvonalennuskäyristä. Lopullinen tien kuntoindeksi määräytyy näiden tekijäkohtaisten arvojen perusteella. Menetelmä ei huomioi tienkäyttäjän kustannuksia eikä toimenpiteiden vaikutuksia.



Kuva 6. Tien kuntoindeksin (URCI) muodostaminen tekijäkohtaisisten arvojen q summasta ja arvon $q=5$ ylittävien tekijöiden lukumäärästä (Eaton 1988).

3.4 Muut

3.4.1 Kunnossapidon laatutasotutkimus

Kunnossapidon laatutasotutkimuksessa (TVH, 1985c) tutkittiin kolmella tiellä tien kunnan muutoksia ja toimenpiteiden vaikutuksia. Tutkimuksessa todettiin käytetyistä toimenpiteistä vain höyläyksen parantavan tien kuntoa. Tienkäyttäjän kustannuksia arvioitiin 'Tieliikenteen ajokustannukset 1984' -julkaisun perusteella.

3.4.2 Piippo

Hilkka Piippo tutki diplomityössään (Piippo, 1985) kulutuskerrosmateriaaleille eri maissa asetettavia vaatimuksia, kulutuskerroksen kunnan arviointia ja hoitotoimenpiteitä. Tutkimuksen aikana koetettiin myös arvioida kulutuskerroksen kulumista. Päätelmissään hän esitti kulutuskerroksen kulumisen tarkempaa tutkimista ja soratiestön hoitosuoritteiden tarkempaa seuranta. Samoin Piippo esitti, että suppealla tiekohtaisella työmäärien ja kustannusten seurannalla pyrittäisiin tutkimaan tien liikennemäärän ja kulutuskerrosmateriaalin laadun vaikutuksia.

3.4.3 OECD

OECD:n ja Maailman Pankin ohjeessa tiestön kunnon seurannan järjestämiseksi (OECD, 1990) kuvataan menetelmä tiestön kunnonseurannan organisoimiseksi ja seurattavat kuntomuuttujat. Soratiestölle ohjeessa esitetään muuttujiksi uraisuutta, aaltoilua, poikkileikkausta, kulutuskerroksen paksuutta, eroosioaurioita, reikiä ja pohjamateriaalien esiintymistä tien pinnassa (sorakulutuskerros puuttuu). Tien kunto määrätään kunkin vaurion vakavuus ja esiintymistiheys kolmiportaisella asteikolla luokitellen.

Ohjeessa annetaan myös menetelmä, jolla voidaan ilman mittalaitteita arvioida tien IRI-arvoa (epätasaisuutta, viisiluokkainen arviointiasteikko).

4. Tiestön ylläpidon hallintajärjestelmät

4.1 Tiestön ylläpidon hallintajärjestelmien tavoitteet

Ylläpitojärjestelmien tavoitteena on antaa päätöksentekoon analyttinen tukijärjestelmä. Järjestelmien avulla pyritään i) ennakoimaan tulevaa kehitystä, ii) asettamaan ylläpitotavoitteet optimaalisesti ja iii) kohdentamaan toimenpiteet oikein eli ohjaamaan rajalliset käytettävissä olevat varat sinne missä niistä saadaan suurin hyöty. Tiestön ylläpitojärjestelmiin (Pavement Management Systems, PMS) kuuluvat osakokonaisuuksina päällysrakenteiden rappeutumismallit, tieverkon kunnon arviointi, vaihtoehtoisten toimenpiteiden ja niiden vaikutusten määrittely sekä tienkäyttäjän kustannukset (Tapio 1986).

PMS-järjestelmät voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan kahteen osaan: toisaalta *verkkotason* ohjaukseen ja toisaalta *hanketason* ohjaukseen tehdyt järjestelmät. Verkkotason järjestelmillä tarkastellaan tiestöä kokonaisuuksina ja pyritään löytämään kokonaisuuden kannalta optimaalinen kunto- ja kunnossapitotaso. Hanketason järjestelmillä pyritään valitsemaan yksittäisille kunnossapitokohteille oikeat työmäärät ja toteutusjärjestys.

Vuodesta 1989 alkaen on Suomessa ollut käytössä verkkotason PMS-järjestelmä HIPS ja hanketason järjestelmä PMS88. Yhdysvalloissa ja Kanadassa on toteutettu useita erillisiä PMS-järjestelmiä. Euroopassa hallintajärjestelmiä on käytössä/kehitteillä mm. Tanskassa, Ranskassa, Italiassa ja Iso-Britanniassa. Suomen Tielaitokselle kehitettyjä HIPS ja PAS-järjestelmiä on käytetty myös Kiinassa ja Ruotsissa.

Järjestelmistä saadut kokemukset ovat julkaistujen raporttien mukaan hyviä: järjestelmien avulla on saavutettu huomattavia säästöjä ja tiestön laatutaso on paremman kunnossapidon ohjauksen ansiosta kohonnut (Golabi *& al.*, 1982, Tapio, 1986, Nesbitt *& al.*, 1987 ja Carnahan *& al.*, 1987). Tästä johtuen on Yhdysvalloissa annettu ohjeet, joiden mukaan jokaisessa osavaltiossa on helmikuuhun 1993 mennessä oltava toimiva PMS-järjestelmä (Paredes *& al.*, 1990).

4.2 Highway Investment Programming System (HIPS)

HIPS (CSI, 1989) on TVH:n tilauksesta tehty Markovin prosesseihin (todennäköisyyksiin) perustuva päällystettyjen teiden verkkotason hallintajärjestelmä. HIPSin avulla pyritään ennakoimaan tiestön tulevaa kuntoa ja optimoimaan ylläpitoa. Verkkotason systeeminä HIPS käsittelee maantieteellisen alueen ja liikennemäärän mukaan kuuteen luokkaan luokiteltua tiestöä kokonaisuutena eikä näin ollen tee optimointia tiekohtaisesti. (Ohjelmiston toisessa versiossa luokittelu tehdään myös tien toiminnallisen luokan mukaan kahteen luokkaan ja taustamuuttujaluokkien määrä on näin ollen 12). Tiestön kuntoa kuvaamaan on valittu neljä muuttujaa: kantavuus (K), tasaisuus (T), vauriot (V) ja urat (U). Kullekin muuttujalla on määritetty kolme (kantavuudelle viisi) luokkaa. Tien kuntotila ilmoitetaan näin KTVU-yhdistelmänä. Mahdollisia tiloja tiellä on siten $5 \times 3 \times 3 \times 3$ eli 135. Varsinaiset systeemin mallit ovat tilansiirtotodennäköisyysmatriisit, jotka kertovat yhden vuoden siirtotodennäköisyydet kullekin ylläpitotoimenpiteelle (normaali rappeutuminen on analoginen varsinaisten toimenpiteiden kanssa). Siirtotodennäköisyyksien lisäksi määrätään sekä käyttäjän että tienpitäjän kustannukset eri toimenpidevaihtoehdoissa, sallitut tilat kullekin toimenpiteelle ja mahdolliset budjettirajoitukset (panostus [mk / tiekm]). Markovin prosesseja PMS-järjestelmissään ovat käyttäneet myös mm. Golabi *& al.* (1982) ja Gendreau *& al.* (1989).

HIPS-järjestelmällä haetaan ensivaiheessa lineaariseksi ohjelmaksi formuloidulla markovilaisella päätöksentekoprosessilla optimaalista, tienpitäjän ja tienkäyttäjien kustannusten summaa minimoivaa vakiotila-politiikkaa ja vastaavia kustannuksia. Tehtävän ratkaisu antaa optimaalisen kuntotilajakauman ja kullekin kuntotilalle optimaalisen toimenpiteen.

Toisessa vaiheessa etsitään annetuin budjettirajoin optimaalista tietä nykytilasta tavoitetilaa (valiotila-tehtävän optimi) lyhyessä (tavallisesti 8 vuotta) ajassa. Optimoinnissa huomioidaan ensisijaisesti nopein tie tavoitetilaa ja toissijaisesti kustannukset tavoitteeseen pyrittäessä.

Verkkotason suositukset siirretään hanketason järjestelmiin (Project Analysis System, PAS sekä PMS91), joilla varsinainen ylläpidon toimenpideohjelma tehdään. Kaavio sekä HIPSin että PASin toiminnasta on liitteessä C.

HIPS-ohjelmiston ensimmäisen version käyttöliittymä toteutettiin K-Mies-ohjelmalla. Valmistumassa oleva (syys-1990) toinen versio toteutetaan C-kielellä ohjelmoituna. Lineaarinen optimointi tehdään kummassakin versiossa Lindo-ohjelmalla. Versioon 2 on otettu mukaan asfalttiteiden lisäksi kevytpäällystetiet. Uusi versio toimii nopeammin ja mallien muuntelu on helpompaa kuin versiossa 1.

4.3 Ylläpitojärjestelmän mallityypin valinta

Oleellinen valinta järjestelmää tehtäessä on rappeutumismallin tyyppi. Tapio (1986) kuvaa asetettavia vaatimuksia seuraavasti:

Hyvä rappeutumismalli ennustaa tarvittavat ylläpitotoimenpiteet sellaisessa muodossa, että eri kunnostuspolitiikkojen vertailu suhteessa tienpitäjän ja -käyttäjän kustannuksiin on mahdollista. Erityisesti rappeutumismallilla tulee voida ennustaa tieverkon kunto tulevaisuudessa eri toimenpiteillä tai ilman niitä. Samoin eri vaihtoehtoisten toimenpiteiden tehokkuuksien vertailu on oltava mahdollista. Edellä mainittu tulee olla mahdollista myös ottamalla huomioon eri toimenpiteiden kestoajat. Tuleva tiestön kunnon tila tulee olla helposti verrattavissa tienpitäjän ja -käyttäjän kustannuksiin.

Tapio luettelee neljä erilaista empiiristä lähestymistapaa: i) epätasaisuuskäyrät, ii) kaksivaihemallit, iii) Markovin mallit ja iv) kestoikä-todennäköisyysmallit. Kolmea ensin mainittua menetelmää on yleisesti käytetty, kun taas neljättä on käytetty vain kokeilumielessä (vaatii lähtötiedoikseen laajan aikasarja-aineiston).

Koska toisaalta sorateiden käyttäytymiseen vaikuttaa moni satunnainen suure ja toisaalta kestopäällystettyjen teiden HIPS-järjestelmä käyttää Markovin ketjuja tien rappeutumista kuvaamaan, onkin luonnollista, että HIPSin kaltainen stokastinen lähestymistapa valittaisiin myös sorateille. Asiantuntijoiden kanssa käytyjen

keskustelujen perusteella päädyttiin tässä työssä kokeilemaan Markovin ketjujen sijasta *semi-Markovin prosessien* soveltuvuutta tähän ongelmaan. Semi-Markovin prosesseja käyttäviä päätöksentekojärjestelmiä ei ole toteutettu kuin muutamia (White D.J., 1985). Päälystettyjen teiden ylläpidon hallintajärjestelmään semi-Markovin prosesseja ovat käyttäneet Nesbitt ja Sparks (1987) Kanadassa.

4.4 Semi-Markovin prosessi ja semimarkovilainen päätöksentekoprosessi

Semi-Markovin prosessi (SMP) on stokastinen prosessi, jossa siirtymiset tilasta toiseen tapahtuvat Markovin ketjun tavoin ja kussakin tilassa pysymisaika on edellisistä pysymisajoista riippumaton satunnaissuure. Howardin (1971) antaman havainnollisen esimerkin mukaan semi-Markovin prosessin voidaan ajatella olevan kuten sammakko, joka hyppii lammella lumpeenlehdeltä toiselle. Sammakko on prosessi ja lumpeenlehti prosessin tila. Kullakin lehdellä sammakko viettää satunnaisen ajan ja valitsee seuraavan lehden satunnaisesti. SMP esitellään tarkemmin liitteessä B.

Markovin prosessien tavoin voidaan semi-Markovin prosessin tiloihin ja tilasiirtoihin liittää kustannukset. Päätöksenteon perusongelmaan — miten valita kuhunkin tilaan tullessa käypä toimenpide siten, että odotettavissa olevien kustannusten nykyarvo (tai kustannus ajanyksikköä kohti) olisi mahdollisimman pieni — ei olemassa yleistä ratkaisua. Optimointiongelmaa pyritään tavallisesti ratkomaan olettaen vakiotila ja toivoen, että näin saatu helpommin ratkaistava tehtävä olisi hyvä approksimaatio alkuperäiselle tehtävälle. Vakiotila-ratkaisuun käytetään tavallisesti ns. policy-space-iteraatioita, jotka voidaan formuloida myös lineaarisen ohjelmoinnin tehtävinä:

$$\min \sum_j \sum_k \tau_j^k r_j^k y_j^k$$

ehdoilla

$$\sum_k y_j^k - \sum_i \sum_k p_{ij}^k y_j^k = 0,$$

$$\sum_j \sum_k \tau_j^k y_j^k = 1 \quad \text{ja}$$

$$y_j^k \geq 0. \quad (9)$$

Tässä i ja j ovat prosessin mahdollisia tiloja, p_{ij} :t ovat todennäköisyyksiä, joilla tilasta i siirrytään tilaa j , τ_j on tilassa j pysymisajan odotusarvo, r_j tilassa j käynnistä aiheutuneen kustannuksen odotusarvo ja k viittaa tilaan saavuttaessa valittuun toimenpiteeseen. Y_j :t ovat päätösmuuttujia, joiden arvoista voidaan ratkaista optimaalinen vakiotila-jakauma.

5. Mittaustulosten analysointi

Tässä luvussa esitetään aluksi suoritettut mittaukset ja tulosten yhteenvedot. Tämän jälkeen tarkastellaan tien käyttäytymistä ja toimenpiteiden suorittamista ensin kuntoarvion perusteella ja tämän jälkeen käyttäen pomppumittarilla mitattua epätasaisuutta ja muita mitattuja tietoja.

5.1 Yleistä

Sorateiden kunnon vaihteluiden ja erilaisten toimenpiteiden vaikutuksen selvittämiseksi aloitettiin kesällä 1988 viikottainen kunnon seuranta koeteillä Hämeen ja Oulun tiepiirien alueilla. Seuranta suoritettiin kesäkuun alusta elokuun loppuun. Kunnon seurantaa jatkettiin vuonna 1989 ja karsittuna myös 1990.

5.1.1 Koetieverkko

Koetiet valittiin satunnaisotoksena tierekisteristä. Koeteitä oli kahdeksan tiemestaripiirin alueella Hämeen piireissä ja kuuden tiemestaripiirin alueella Oulun piirissä. Koetiet jakaantuivat tasan kolmeen liikennemääräluokkaan: KKVL alle 100, 100-200 ja yli 200 ajoneuvoa vuorokaudessa. Yhteensä koetietä oli n. 360 km. Koetie, *kyltti*, muodostui 2,5 - 3 kilometrin mittaisesta yhtenäisestä tieosuudesta, joka oli edelleen jaettu 5-6 *osuuteen* à 500 m. Tien kunto arvioitiin osuuksittain. Erilaisten hoitostrategioiden vaikutusta selvitettiin valitsemalla kummankin piirin koeteistä kyltit, joita pyrittiin hoitamaan joko paremmin tai huonommin kuin normaali käytäntö edellyttää. Keväällä 1989 pidetyn tiemestarikokouksen jälkeen jouduttiin muutamia kylttejä kokonaan poistamaan koetieverkosta ja osassa erikoisstrategiaosuuksista palaamaan normaaliin hoitokäytäntöön.

5.1.2 Mittausmenetelmät

Mittaus suoritettiin kesinä 1988 ja 1989 kesäkuun alusta elokuun loppuun. Laiterikkojen takia kumpanakin kesänä jäi yksi viikko mittaamatta. Tämän lisäksi jätettiin väliin juhannusviikko. Koetieverkolta arviotiin viikottain tien kunto TVH:n kuvastandardin perusteella (TVH, 1986). Muistiin merkittiin erikseen tasaisuus, kiinteys ja pölyävyysarvo. Samalla mitattiin tien epätasaisuus summaavalla sykäys- (1. pomppu-) mittarilla. Kunnan arvionnin suoritti Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen (VTT) tie- ja liikennelaboratorion mittausryhmä. Ryhmä ajoi koetiet läpi viikon aikana alkaen Hämeestä maanantaisin ja päätyen loppuviikolla Ouluun. Kuntoarviointien ohessa ryhmä arvioi koeosuuksien metsäisyysprosentit.

VTT:n ja tiemestareiden arvioiden vertailemiseksi suoritettiin 1989 kesällä kolmen viikon (viikot 26, 30 ja 34) aikana kontrollointiarvio. Tällöin tiemestarit arvioivat koeteiden kunnan samoina päivinä, joina VTT:n ryhmä suoritti oman osuutensa.

Kumpanakin kesänä merkitsivät koeteitä hoitavat tiemestarit koeteillä suorittamansa hoito- ja kunnossapitotoimenpiteet sekä toimenpideviikot muistiin. Kesällä 1989 kirjattiin myös syy toimenpiteen suorittamiseen sekä toimenpideajankohta viikonpäivän tarkkuudella.

Keväällä ja syksyllä 1988 mitattiin koetieverkolta kulutuskerroksen paksuus kilometrin välein ja samalla kulutuskerroksesta otettiin näyte rakeisuuden selvittämiseksi. Paksuusmittaus samoin kuin rakeisuusnäytteen otto suoritettiin tien molemmilta kaistoilta. Paksuusmittaus toistettiin vuonna 1989 karsittuna. Syynä karsimiseen oli mittauksen työläys ja työvoimapula. Hämeen piirin alueella tehtiin 1989 lisäksi kontrollimittauksia, joissa kerrospaksuus mitattiin 200 m välein.

Kevään 1989 aikana arvioivat tiemestarit koeosuuksilta ohjeen mukaan rakenteen kuntoa kuvaavat heittojen ja painumien lukumäärän, pehmeikköjen määrän sekä kevätkantavuuskertoimen. Arviot kirjattiin koeosuuksittain.

Tierekisterissä on koeosuuksilta saatavissa tien leveys, liikennemäärä, kantavuustiedot ja kantavuusmittausten yhteydessä arvioitu kevätkantavuuskerroin. Analyyseissä käytettiin SAS-versiota tierekisteristä 1.1.1989 ja erikseen mainittaessa versiota 1.1.1990.

Kuukausittaiset sademäärät ja niistä lasketut kesäkuukausien keskiarvot saatiin Ilmatieteen laitoksen kuukausitiedotteista.

Tien kunnon vaikutusta polttoaineen kulutukseen pyrittiin selvittämään ajamalla koeteitä polttoaineenkulutusta mitaten. Tulokset näistä mittauksista eivät ole vielä käytettävissä.

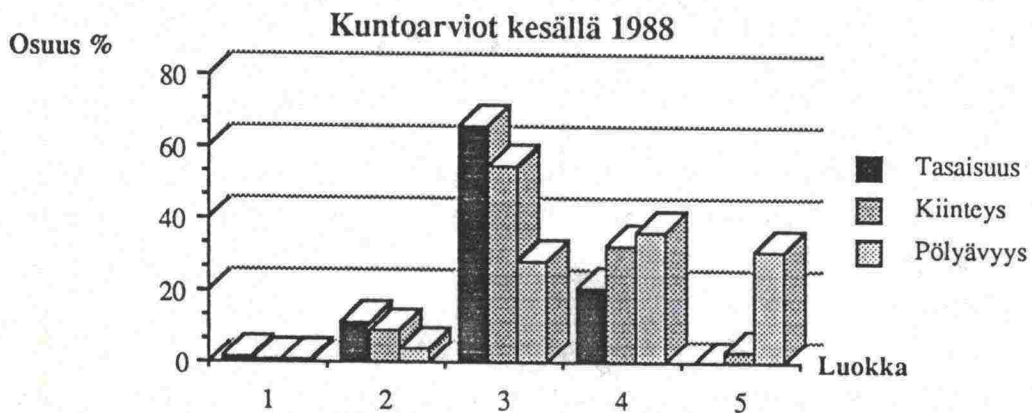
5.1.3 Tulosten käsittely

VTT:n tulosten tallennus suoritettiin vuoden 1988 osalta TVH:ssa ja vuoden 1989 VTT:llä. Tiemestareiden keräämät tiedot tallennettiin TVH:ssa. Tietojen käsittely suoritettiin pääosin SPSS/PC- ja SAS-ohjelmistoilla mikrotietokoneilla sekä TVH:n HP9000-laitteistoilla.

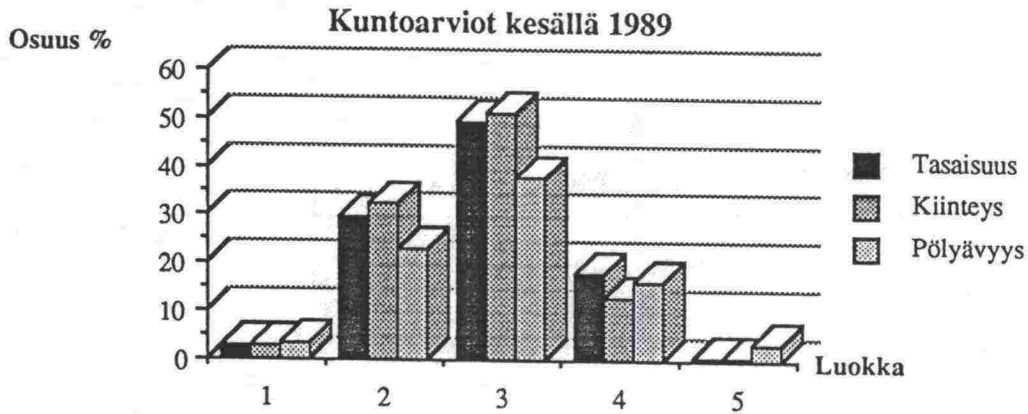
5.2 Yhteenvedot mittauksista

5.2.1 VTT:n kuntoarviot

VTT:n suorittamassa kuntoarvioinnissa esiintyi kiinteys- ja tasaisuusarvioita 1 tai 5 hyvin pieni osuus. Luokan 5 osuus selittyy osin ohjeen kuvauksilla. Arviointiohjeessa ei ole kuvattu luokkien 4 ja 5 eroa kovin suureksi. Luokassa 4 ei pölyä esiinny ja pölyävyyttä ei ole luokkaan 5 kuvattu lainkaan. Tarkasti ohjetta noudatettaessa ei tie voi saada kuntoarvoa 5 lainkaan. (kuntoarvo = min {tasaisuus, kiinteys, pölyävyys}).



Kuva 7. Kesän 1988 arviointien jakauma kuntoluokittain.

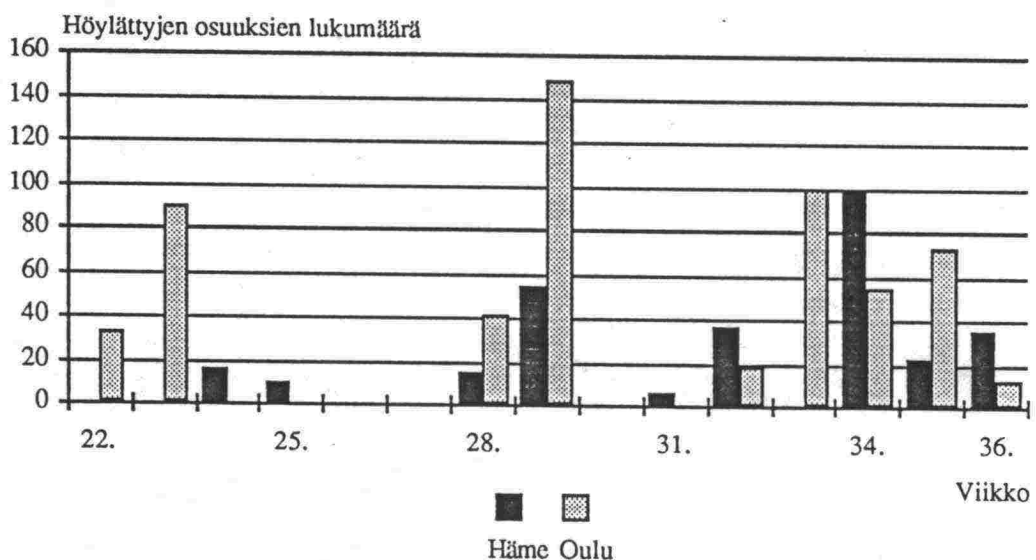


Kuva 8. Kesän 1989 arviointien jakauma kuntoluokittain.

Viikottaiset jakaumat kuntoluokittain ja alueittain ovat liitteessä C.

5.2.2 Toimenpiteet

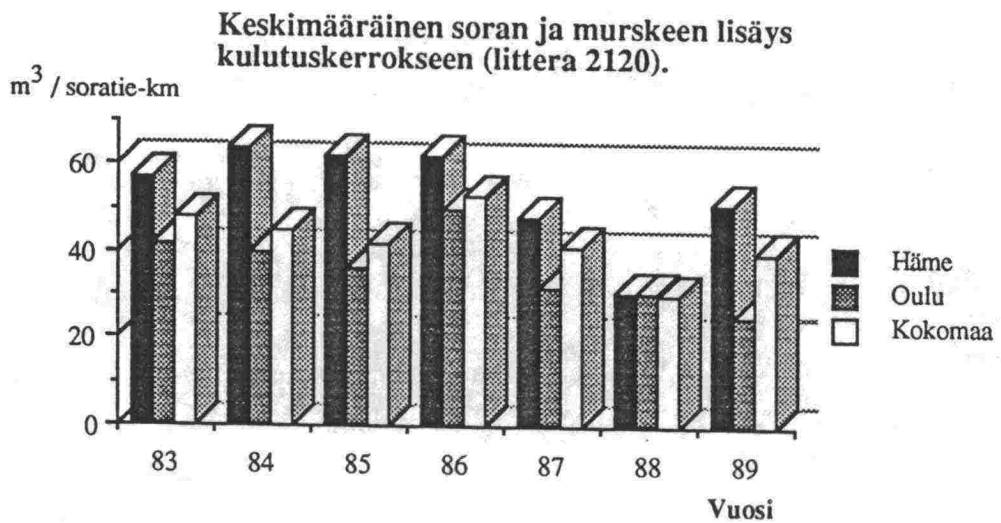
Tiemestarit merkitsivät muistiin teettämänsä hoitotoimenpiteet kylteittäin. Koska seuranta alkoi vasta kesäkuun alussa, oli molempina tutkimusvuosina suuri osa kevättöistä (muokkaushöyläys) jo suoritettu seurannan alkaessa (viikko 22). Tasaushöyläyksiä suoritettiin selvästi eniten heinäkuun lopussa ja elokuun alkupuolella.



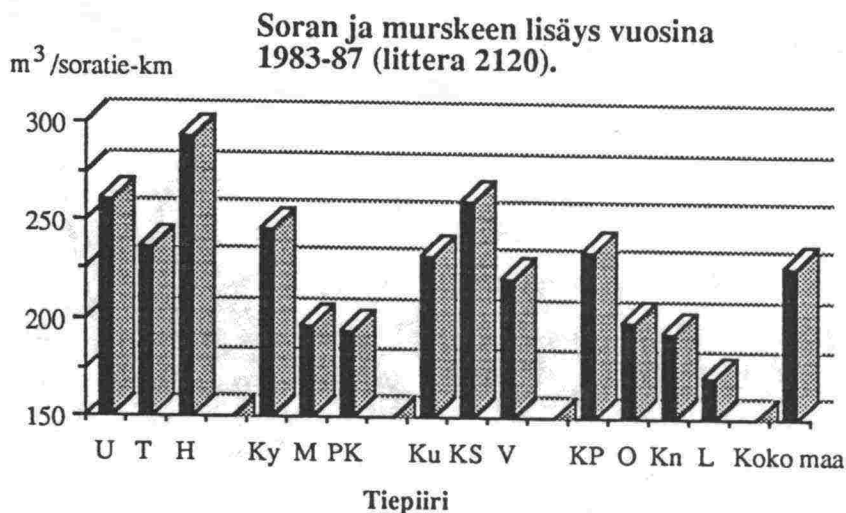
Kuva 9. Höyläyksen suoritus viikottain vuonna 1989.

5.2.3 Kulutuserospaksuus

Kulutuserospaksuus on sorateillä helposti (joskin aikaavievästi) mitattavissa, mutta hankalasti tulkittavissa. Varsinkin Hämeen tiepiirin alueella on kulutuseros paikoin jopa puoli metriä paksu. Hämeen piirin havaitut paksut kulutuserokset ovat seurausta määrätietoisestä politiikasta, jota piirissä harrastettiin 1980-luvun alkupuolella.



Kuva 10. Vuosittainen keskimääräinen soran ja murskeen lisäys kulutuserrokseen (littera 2120) Hämeen ja Oulun tiepiireissä sekä koko maassa keskimäärin (Yleisten teiden kunnossapitotilastot 1987 ja 1989).

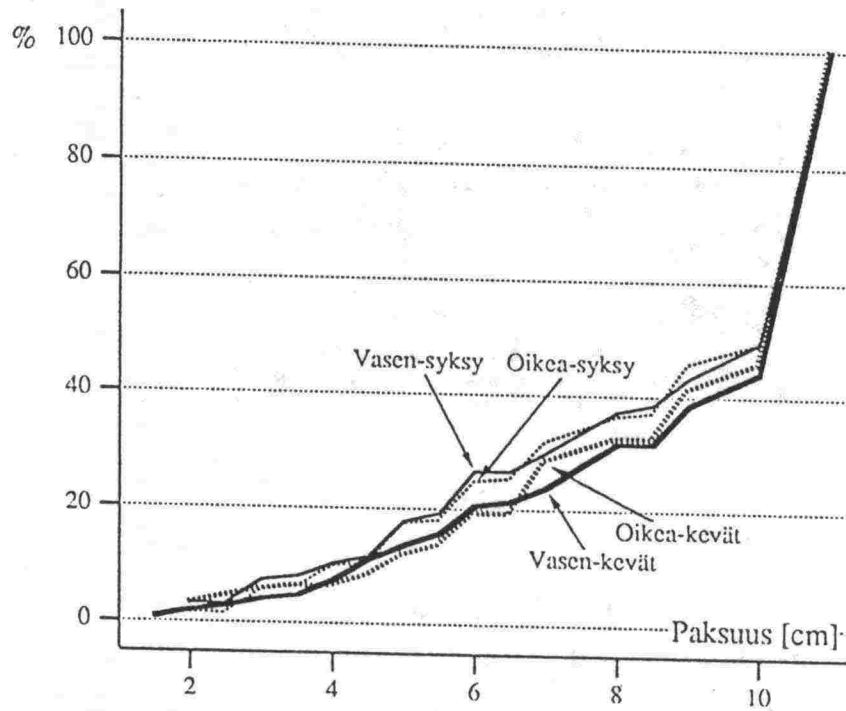


Kuva 11. Soran ja murskeen lisäys kulutuskerrokseen piireittäin vuosina 1983-87 (Yleisten teiden kunnossapitotilasto 1987).

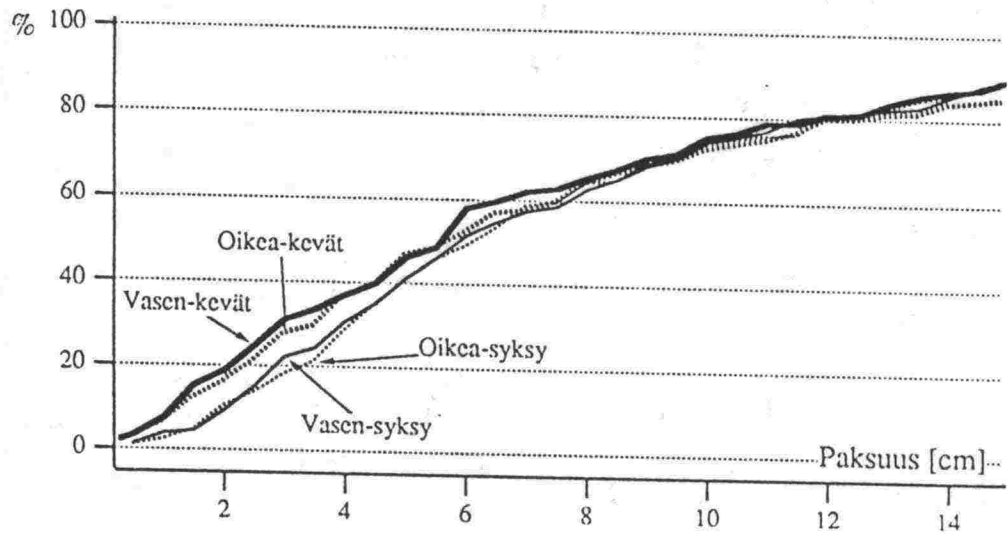
Ero Hämeen piirin ja muiden tiepiirien välillä on selkeä. Jos oletetaan keskimääräisen tieleveyyden olevan 6 m, todetaan Hämeessä sorateille levitetyn viidessä vuodessa (1983-87) keskimäärin 4.9 cm, Oulussa 3.3 ja koko maassa 3.8 cm paksuinen kerros. Ohjeitten mukaan toimittaessa kulutuskerrosta lisätään 3 cm kerrallaan. Tästä laskien saadaan keskimääräiseksi sorastusväliksi Hämeessä 3, Oulussa 4.5 ja koko maassa 3.9 vuotta.

Vuonna 1988 kulutuskerroksesta otettiin näytteet ja kerrospaksuudet mitattiin kilometrin välein kummaltakin kaistalta. Kerrospaksuus mitattiin sekä keväällä että syksyllä.

Vuonna 1988 ei Hämeessä mitattu koko kulutuskerroksen paksuutta, jos se ylitti 10 cm ja vuonna 1989 jos paksuus ylitti n. 30 cm, jolloin kuopan kaivaminen kävi hankalaksi.



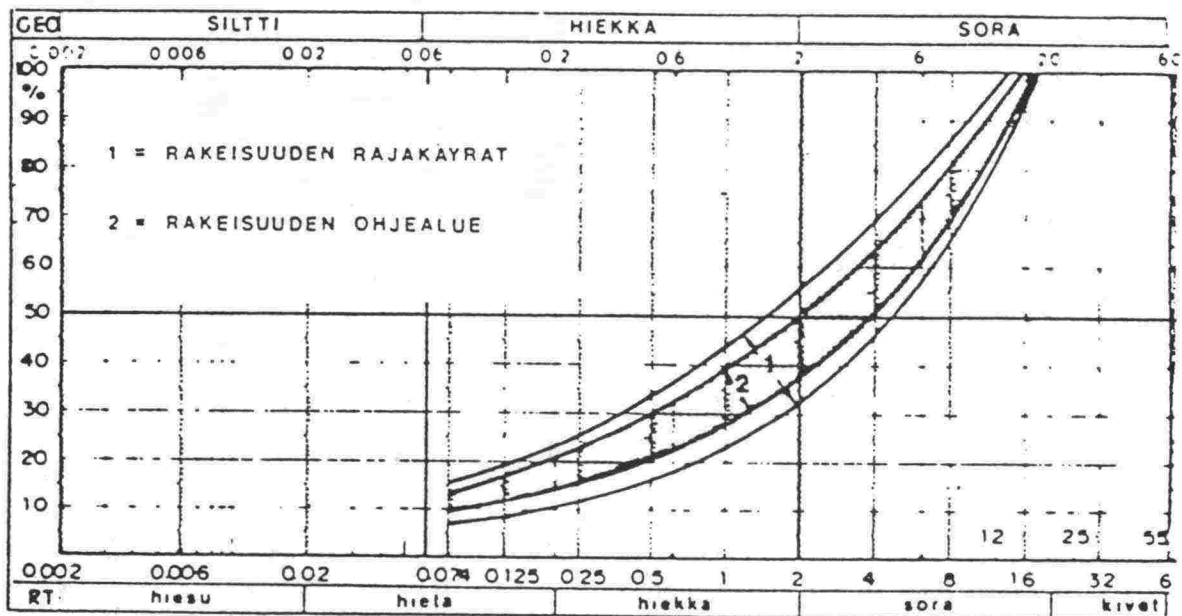
Kuva 12. Kerrospaksuudet Hämeessä 1988.



Kuva 13. Kerrospaksuudet Oulussa 1988.

5.2.3 Suhteistus

Kulutuserroksen materiaalin suhteistukselle annetaan suomalaisissa ohjeissa (TVH, 1979) ohjekäyrät, joiden välissä materiaalin tulisi olla.



Kuva 14. Kulutuserosmateriaalin suhteistuksen ohjekäyrät (TVH 1979).

Kulutuserosmateriaalien suhteistusta tutkittiin seulojen 0.074 mm, 0.125 mm ja 0.5 mm läpäisyprosenttien avulla. Ohjekäyrien mukaiset läpäisyt näillä seuloilla ovat (TVH 1979):

Taulukko 2. Ohjekäyrien mukaiset läpäisyprosentit (TVH 1979).

seula	läpäisy-%
0.074	13 - 16
0.125	16 - 19
0.5	27 - 34

Poikkeamat ohjekäyristä vaikuttavat tien rappeutumistapaan. Seuraavassa taulukossa 4 on koeaineiston seulantatulokset luokiteltu TkT Asko Saarelan mukaan käyttäytymiseltään poikkeaviin luokkiin.

Taulukko 3. Ohjearvoista poikkeavien näytteiden lukumäärät alueittain ja liikennemääräluokittain (- alle, o käyrillä, + yli):

Seula			Häme			Oulu		
S074	S125	S5	I	II	III	I	II	III
-	-	-	5	7	-	12	25	28
-	o+	-	2	4	-	-	-	2
-	o+	o+	21	27	7	15	17	23
o	o	-	-	4	4	2	2	-
+	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	o+	7	9	2	30	31	22
o	o	o	56	37	7	25	21	13
o	o	+	5	21	13	17	29	8
+	o+	o+	14	2	12	5	11	5
muut			11	8	7	2	2	2
yhteensä			121	119	52	108	138	103

Paterson (1987) käyttää kaavoissaan materiaalin hienoaineksen suhteita kuvaavaa 'dust-ratiota' eli hienoainessuhdetta P075 / P425.

Käyttäen (Patersonin käyttämien) seulojen 0.075 mm ja 0.425 mm asemesta seuloja 0.074 mm ja 0.5 mm sekä ohjekäyrän arvoja saadaan näin lasketun läpäisyprosenttien suhteen, hienoainessuhteen, arvot väliltä 0.38 - 0.59:

Taulukko 4. Hienoainessuhde suhteistuksen ohjekäyrien mukaan.

Seulan S5 läpäisy-%	Seulan S074 läpäisy-%		
	13	14.5	16
27	0.48	0.53	0.59
30.5	0.43	0.47	0.52
34	0.38	0.43	0.47

Rakeisuuskäyrän perusmuodon ns. Fullerin käyrän mukainen hienoainessuhde on:

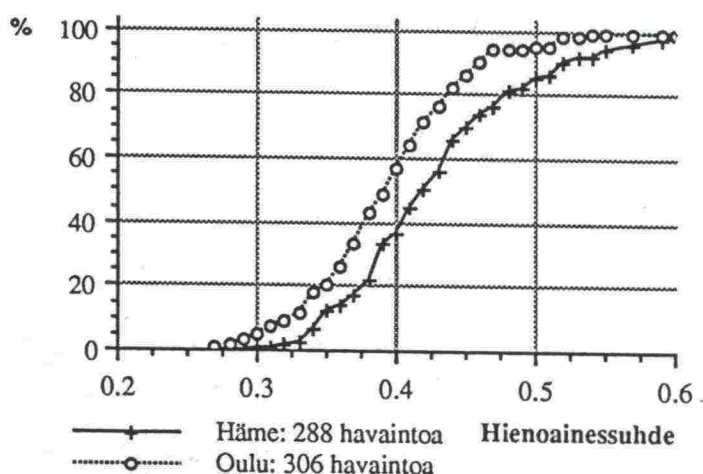
$$S = \frac{(0.074 / D)^{0.5}}{(0.5 / D)^{0.5}} = 0.38 ,$$

jossa D on suurin raekoko.

Hienoainessuhde kuvaa suhteistuskäyrän kaltevuutta. Kuten havaitaan poikkeaa ohjekäyrien kaltevuus Fullerin käyrän kaltevuudesta. Mikäli hienoainessuhde on pienempi kuin 0.47 on materiaalissa hienoaineksen määrä pienempi kuin ohjekäyrän muoto edellyttää.

Koeteiden seulontanäytteistä lasketut hienoainessuhteet osoittavat alueitten välillä olevan eroja ja että 20-40 %:lla näytteistä hienoainessuhde oli alle 0.38:n.

Hienoainessuhteen (suhteen S074/S5) jakauma koeteilla



Kuva 15. Hienoainessuhde-jakaumat alueittain.

Kulutuskerrosmateriaalin laadunmuutoksia aiheuttavat irtonaiseksi jääneestä pinnasta pois pölyävä hienoaines ja liikenteen sekä tiellä suoritettujen toimenpiteiden aiheuttama materiaalien murskautuminen. Pinnan kiinteys on tärkeää, koska (Piipon (1985) mukaan) kiinteässä kulutuskerroksessa oleva materiaali kestää paremmin kulutusta kuin irtonainen aines.

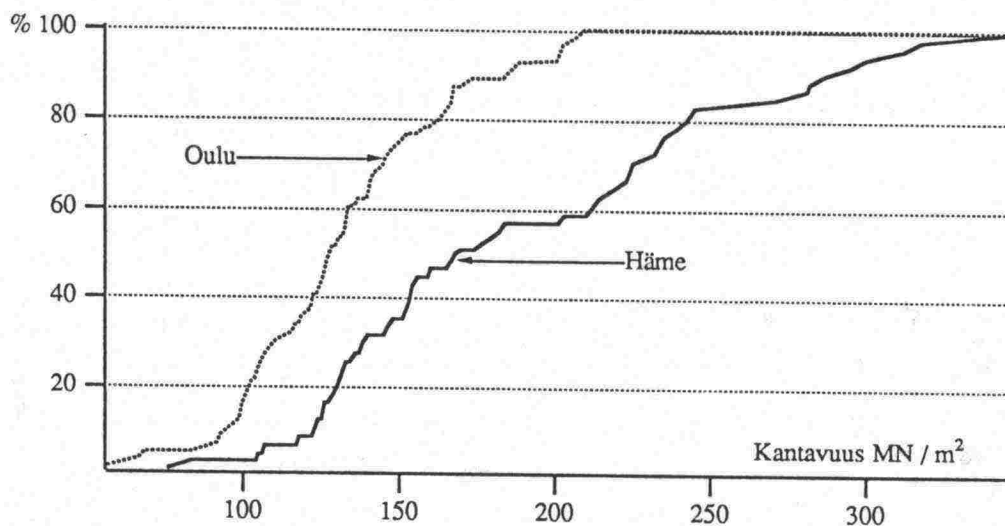
5.2.4 Kevätkantavuuskerroin ja kantavuus

Tutkimuksen yhteydessä tiemestarit arvioivat koe-osuuksilta kevätkantavuuskertoimen. Kevätkantavuuskerroin löytyy myös tierekisteristä tieosakohtaisena tietona. Näiden kahden tiedon (arvion) ristiintaulukointi osoittaa että joko kerroin on osalta osuuksia muuttunut tai arviointiperusteet ovat olleet erilaiset. Muutoksen on voinut aiheuttaa esimerkiksi tien kunnostus.

Taulukko 5. Kevätkantavuuskertoimet tierekisterissä ja tiemestarien arvioimana.

		Tiemestarit			
		0.4	0.6	0.8	Yhteensä
Tierekisteri	0.4	27	100	15	142
	0.6	41	90	72	203
	0.8	10	17	7	34
	Yhteensä	68	207	94	

Tiekisterissä oleva kantavuustieto mitataan pistekohtaisena tasavälein ja rekisteriin viedään tieosittain keskiarvotieto.



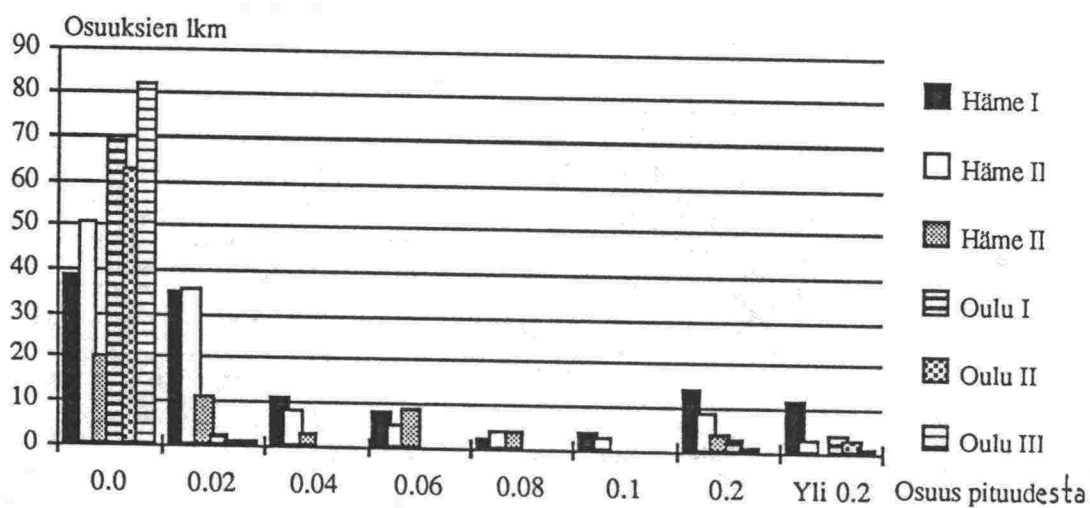
Kuva 16. Kantavuusarvojen jakauma alueittain (Tierekisteri 1.1.1989).

Sorateitten tavoitekantavuus on 80 MN/m².

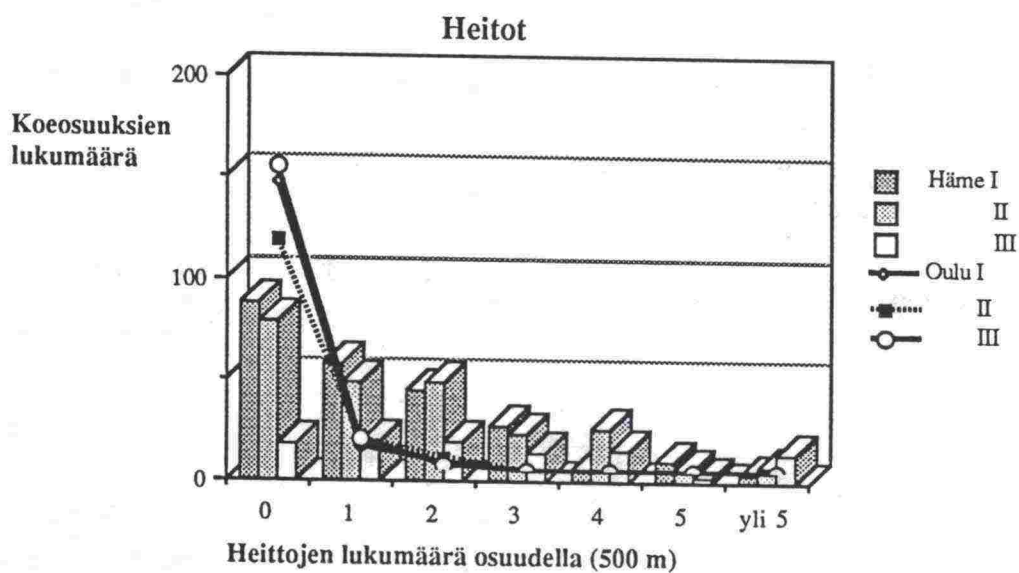
5.2.5 Routavauriot

Koecsuuksilta kartoitettiin keväällä 1989 routavauriot: pehmenevät kohdat [m²] sekä heitot ja painumat [kpl]. Vaurioiden inventointi oli kevään etenemisestä johtuen myöhässä. Suuri osa vaurioista oli jo korjattu eikä niitä enää täten voitu havaita.

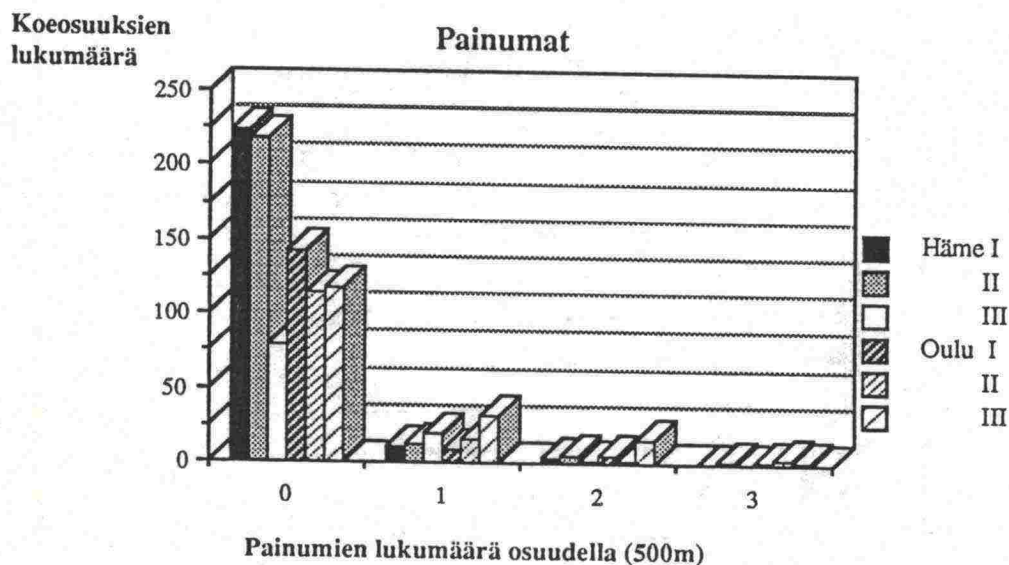
Pehmenevien kohtien osuudet tiepituudesta



Kuva 17. Pehmenevien kohtien esiintyminen koeosuuksilla.



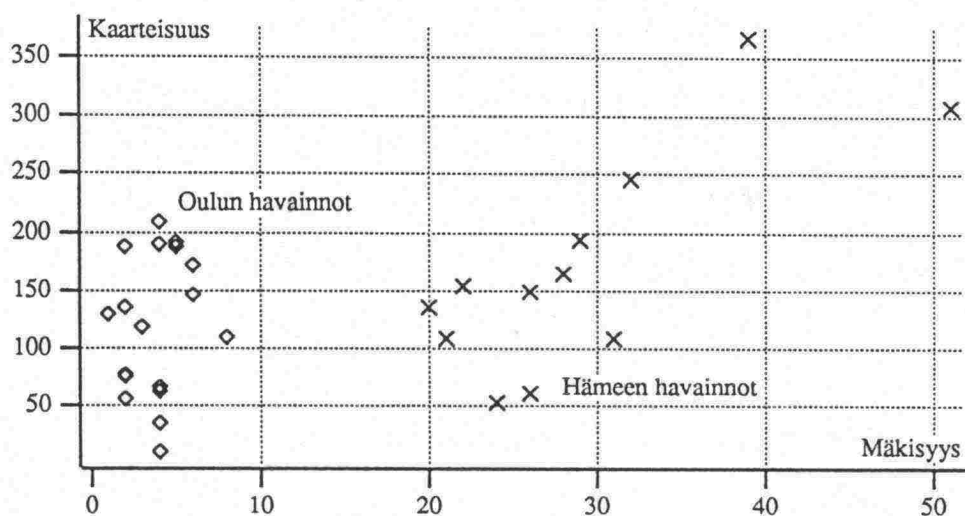
Kuva 18. Heittojen lukumäärät koeosuuksilla.



Kuva 19. Painumien lukumäärät koeosuuksilla.

5.2.6 Tiegeometria

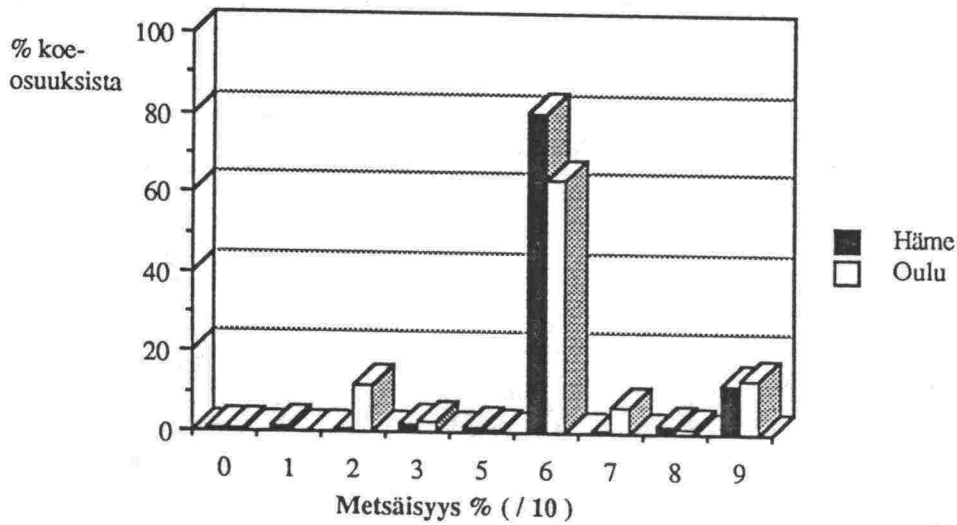
Tierekisteriin on tallennettu tieto mäkisyydestä ja kaarteisuudesta niiltä osin kuin ne mitattu. Koeosuuksilta geometriatieto löytyy 303:lta tiedon puuttuessa 448:lta osuudelta. Geometriatieto on tieosakohtainen tieto, joten vaikka todellisuudessa saman kyltin eri osuuksien geometriat vaihtelevat, eivät niiden tierekisteristä saatavat tiedot poikkea.



Kuva 20. Tiegeometriahavainnot koeosuuksilta (Tierekisteri 1.1.1989).

5.2.7 Metsäisyysprosentti

Koeteiltä arvioitiin tien ympäristön peitteisyyttä kuvaava metsäisyysprosentti. Metsäisyysprosentti 60 on vallitseva metsäisyys ja tästä poikkeavia arvoja on vähän.



Kuva 21. Metsäisyysprosentit koeosuuksilla.

5.2.8 Sateet

Tutkimuskesien sademäärät selvitettiin Ilmatieteen laitoksen kuukausikatsauksista. Koska säähavaintoja ei ollut saatavissa suoraan kaikkien tiemestaripiirien alueilta, käytettiin näiden tiemestaripiirien sademäärinä lähinnä olevan havaintopisteen arvoja.

Taulukko 6. Keskimääräiset sademäärät kesä-elokuussa [mm] (Ilmatieteen laitoksen kuukausikatsaus).

Säähavaintoasema	Tiemestaripiiri	1988	1989	1931-60
Jokioinen	Forssa, Urjala	77	69	62
Hattula	Hämeenlinna	65	86	63
Tampere	Pirkkala, Lempäälä	124	68	64
Juupajoki	Orivesi	83	72	70
Kuru	Kuru	128	68	74
Ruovesi	Vilppula	105	66	67
Oulu-lentoasema	Kempele	56	79	59
Oulu-Linnanmaa	Oulu	67	79	61
Kärsämäki	Piippola	87	94	64
Ruukki	Raahe	72	86	66
Kestilä	Rantsila	88	84	69
Utajärvi	Utajärvi	85	98	66

Vuonna 1988 Hämeessä kesäkuukausien keskimääräinen sademäärä oli suurempi kuin vuonna 1989. Oulun alueella ei vuosien ero ollut yhtä selvä. Sorateiden kesäkuukausien kannalta tärkeän, mutta tutkimuksen ulkopuolella olleen, toukokuun sademäärät olivat Hämeessä vuonna 1988 selvästi vuoden 1989 arvoja suuremmat, kun taas Oulun seudulla tilanne oli päinvastainen. (Liite E).

5.3 Soratien kulutuskerroksen kunnan arviointi

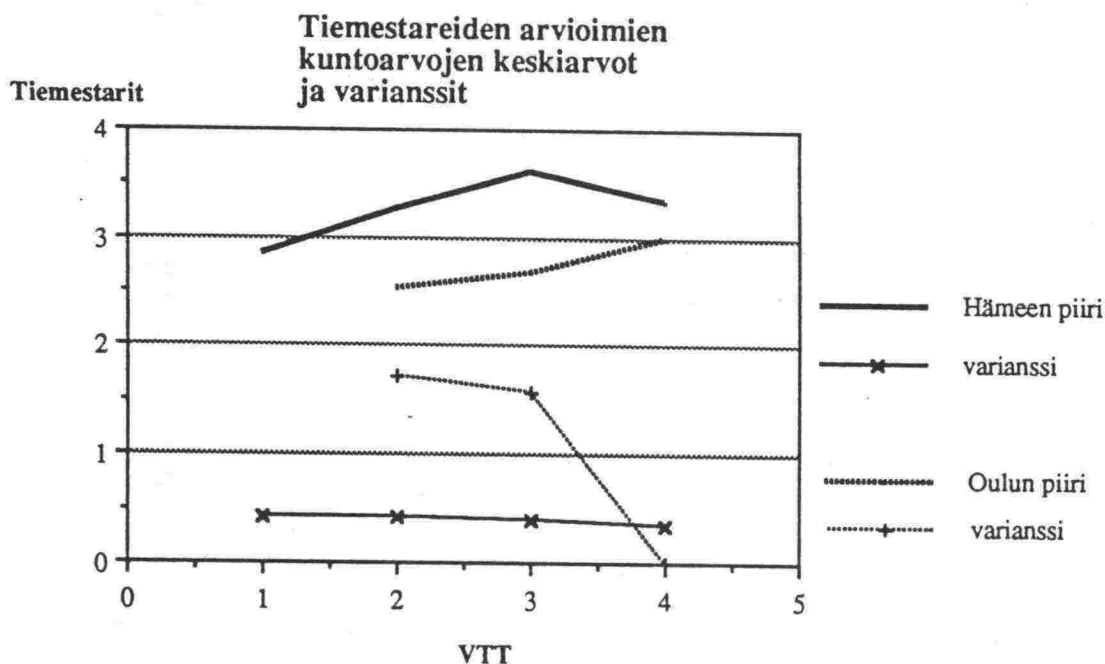
Tiemestarit suorittavat soratien kulutuskerroksen kunnan arviointia käyttäen viisiluokkaista kuntoarvoa. Silmämääräisen arvioinnin etu on arvioinnin halpuus. Kunto saadaan arvioitua nopeasti ja edullisesti ja parhaimmillaan asiantuntevan tiemestarin suorittama arvioiti ottaa huomioon paikalliset olosuhteet.

Ongelmana on kuntotietojen vertailtavuus ja osin myös luotettavuus: Tiemestarin itsensä arvioima tiestön kunto vaikuttaa hänen esimiehiltään saamaansa palautteeseen. Vallalla olevan käytännön mukaan palautetta annetaan vuoden keskiarvolukujen mukaan. Tämä menettely johtaa nopeasti poikkeamien välttämiseen eli arviointiasteikkoa korjataan keskiarvon suuntaan. Korjaamalla tätä käytäntöä voitaisiin arvioinnin tuloksista saada huomattavasti enemmän hyötyä ja samalla parempi kuva tiestön todellisesta kunnosta.

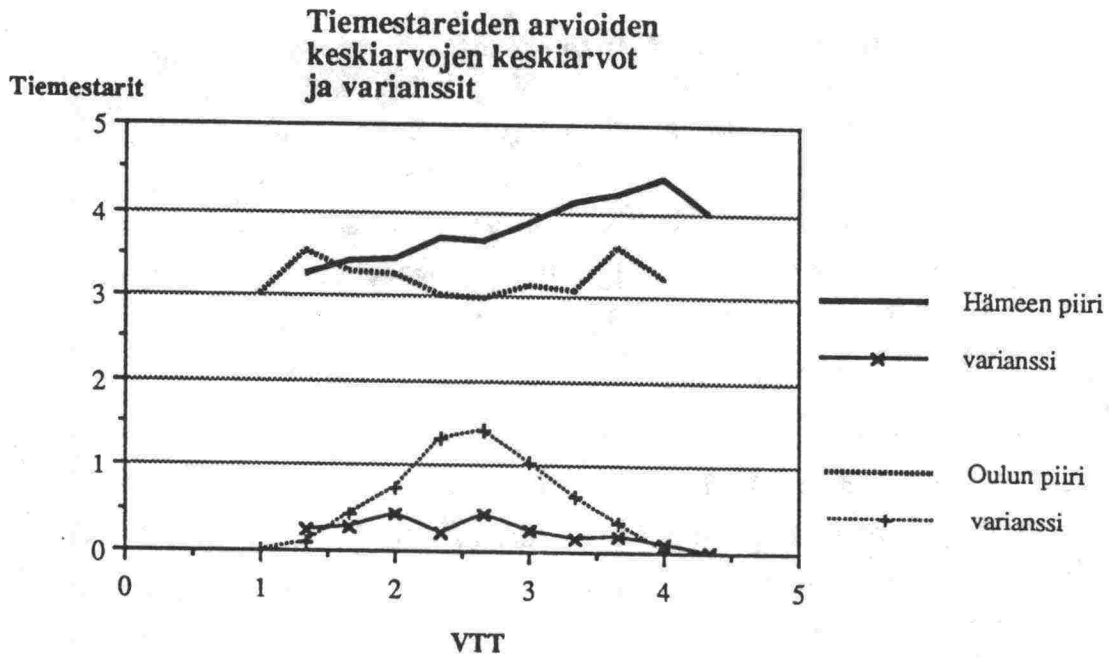
5.3.1 Tiemestareiden kuntoarviot

Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään myös eri henkilöiden kunnonarviointi-asteikkoja. Vertailukohdaksi tiemestareiden tekemille kuntoarvioille asetettiin VTT:n ryhmän suorittama arvio. Koska arvioinnin suoritti aina sama, kokenut henkilö ja yksittäisiä havaintoja kertyi jo ennen ensimmäistä vertailuviikkoa huomattava määrä, voidaan olettaa, että VTT:n arviointiperusteet olivat tiemestaripiiristä riippumattomat.

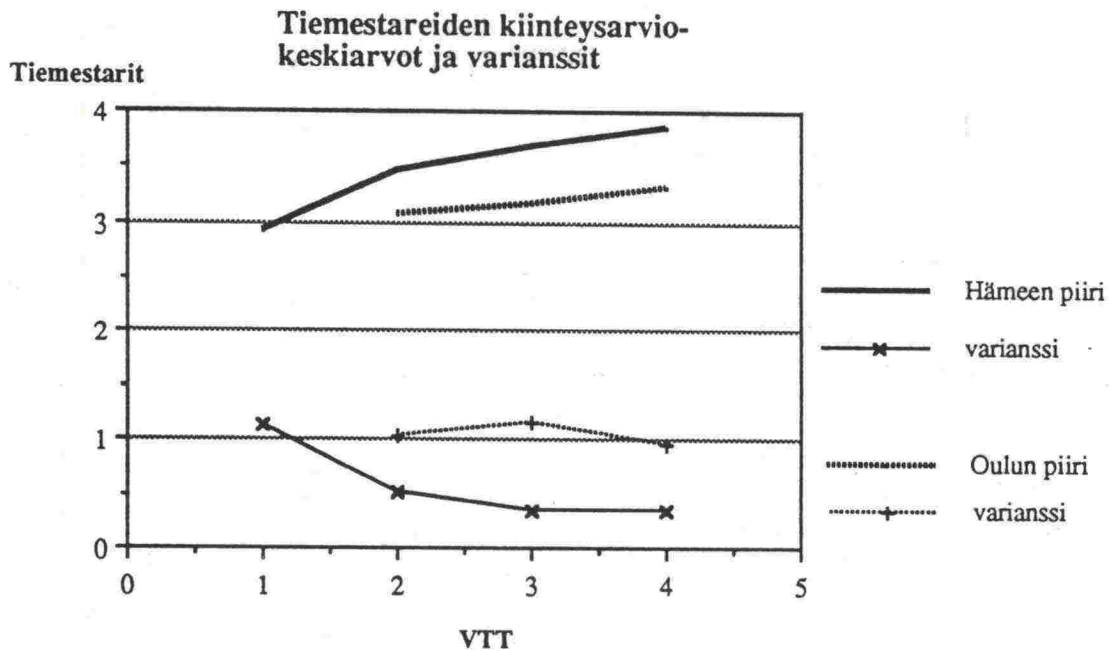
Arviointeja verrataan luokittelemalla tiemestarien havainnot vastaavien VTT:n arvioiden mukaan ja laskemalla näin saatujen luokkien keskiarvot. Kuntoarvo on määritelmän mukaan minimi tasaisuudesta, kiinteystestä ja pölyävyydestä. Kuntokeskiarvo puolestaan on samojen tekijöiden suora keskiarvo. Näiden lisäksi verrataan vielä erikseen tasaisuus- ja kiinteysarvioita. Tiemestaripiirikohtaiset keskiarvot ovat liitteessä F.



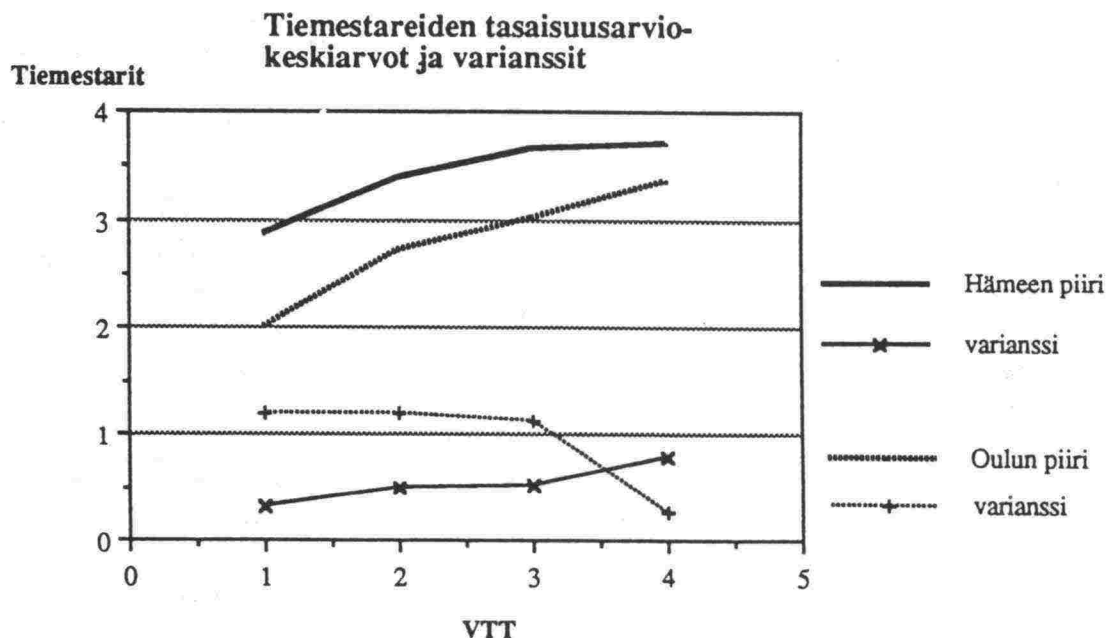
Kuva 22. Tiemestareiden ja VTT:n kuntoarvo-vastaavuus. Tiemestareiden arvioiden keskiarvot ja varianssit luokiteltuina VTT:n arvion mukaan. Kuntoarvo = $\min\{\text{tasaisuus, kiinteys, pölyävyys}\}$.



Kuva 23. Tiemestareiden ja VTT:n kuntokeskiarvo-vastaavuus. Tiemestareiden arvioiden keskiarvot ja varianssit luokiteltuina VTT:n arvion mukaan. Kuntokeskiarvo = (tasaisuus+kiinteys+pölyävyys) / 3.



Kuva 24. Tiemestareiden ja VTT:n kiinteysarvio-vastaavuus. Tiemestareiden arvioiden keskiarvot ja varianssit luokiteltuina VTT:n arvion mukaan.



Kuva 25. Tiemestareiden ja VTT:n tasaisuusarvio-vastaavuus. Tiemestareiden arvioiden keskiarvot ja varianssit luokiteltuina VTT:n arvion mukaan.

Kuten edelläolevista kuvista havaitaan, on VTT:n arvostelu ollut keskimäärin tiukempaa kuin tiemestareiden. Tiemestarit arvioivat huonot tiet paremmiksi ja toisaalta hyvät tiet huonommiksi kuin VTT.

Jatkossa käsitellään pelkästään VTT:n suorittamia kunnon arviointeja ja epätasaisuusmittauksia.

5.3.2 Epätasaisuusluvun ja kuntoarvion vastaavuus

Eri tutkimuksissa (Jóhannesson & al., 1984 ja Paterson, 1987) on raportoitu varsin hyviä korrelaatioita tien mitatun ja arvioidun kunnon välille (katso 3.1-2).

Soratien kuntostandardissa (TVH, 1986) annetaan epätasaisuuslukemalle tienkuntoarvoluokitusta vastaavat rajat:

kuntoarvo	epätasaisuus cm / km
1	> 400
2	360 - 400
3	320 - 360
4	280 - 320
5	< 280.

Epätasaisuuslukeman ja kuntoarvion vastaavuuksia tutkittiin vuoden 1989 aineistolla selittämällä epätasaisuutta kuntoarviolla. Kuntostandardin luokitusperustein (kuntoarvo = $\min\{\text{tasaisuus, kiinteys, pölyävyys}\}$) lasketun mallin epätasaisuus = $f(\text{kuntoarvo})$ selityssaste ei ollut kovin hyvä ($R^2 = 0.148$). Paras tulos saatiin käyttämällä selittäjinä sekä tasaisuus- että kiinteysarviota. Tällöin selityssaste oli $R^2 = 0.35$ ja kaikkien arvojen kertoimien nollasta poikkeamista testaavan t-testin arvo oli merkitsevä.

Taulukko 7. Kuntoarvion ja epätasaisuusluvun vastaavuus.

		Tasaisuus				
		1	2	3	4	5
Kiinteys	1	460	400	360	320	300
	2	430	370	330	290	270
	3	400	340	300	260	240
	4	370	310	270	230	210
	5	360	300	260	220	200

Vuoden 1988 aineistolla pelkkää tasaisuutta luokiteltuna selittäjänä käyttäen saatiin tasaisuusluokkia vastaaviksi epätasaisuusluvuiksi (1...5) 467, 408, 348, 313 ja 296 [$R^2 = 0.15$, t-arvot vakio 22.1 (vastaa luokkaa 5) ja luokittain 1...4: 15.6, 9.62, 5.44, 2.49] ja vuoden 1989 aineistosta vastaavasti (1...5) 401, 313, 270, 239 ja 212 ($R^2=0.08$, t-arvot vakio 13.6 ja luokittain 1...4: 11.4, 6.41, 3.62, 1.61).

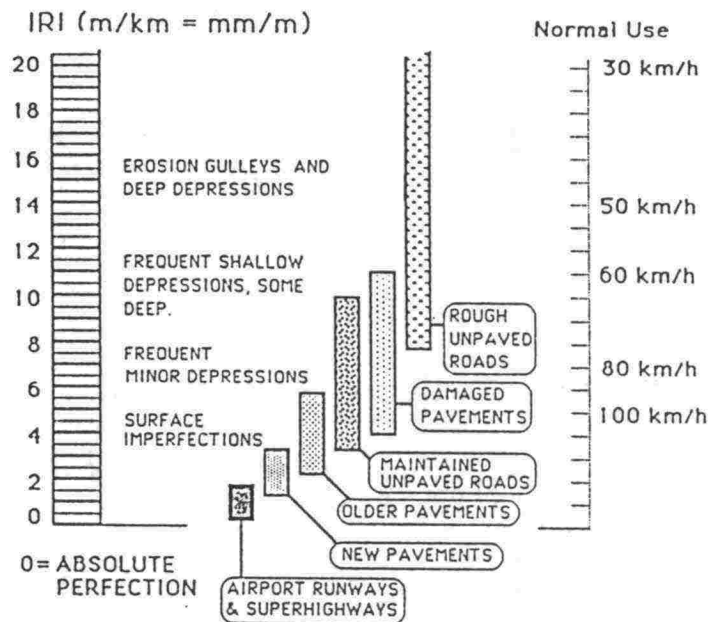
Kuten havaitaan jää selityssaste pelkkää tasaisuutta käyttäen varsin heikoksi. Lisäksi huomataan, että vuoden 1989 arvostelu on ollut epätasaisuusluvulla mitaten tiukempaa kuin vuonna 1988. Vuonna 1989 ei ero luokkien 4 ja 5 välillä ollut merkitsevä. Selvittämättä jäi, minkälainen vaikutus arvostelun tiukkuuteen oli tulosten tallentamiskäytännöllä. Vuonna 1988 kirjattiin koko kesän arviot samalle lomakkeelle kun taas vuonna 1989 käytettiin kullekin viikolle omaa lomaketta.

Standardin epätasaisuusluvun luokitusta olisi syytä tarkentaa. Uusi luokitus voisi olla esimerkiksi (vertailukohdaksi IRI-arvo yhden desimaalin tarkkuudella Patersonin (1987) estimoiman kaavan mukaan: pomppulukema [cm/km] $BI = 63 IRI^{1.12}$):

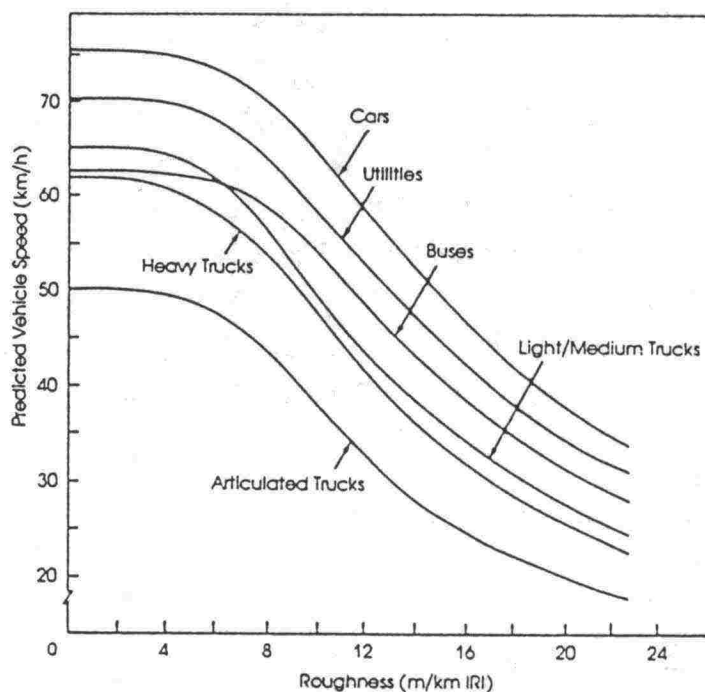
kuntoluokka	epätasaisuus cm/km	m/km IRI
1	> 400	>5.2
2	330 - 400	4.4-5.2

3	290 - 330	3.9-4.4
4	250 - 290	3.4-3.9
5	< 250	<3.4

Tällä luokituksella luokka 5 lähenisi öljysoran epätasaisuutta (öljysorateilla käytettävät tasaisuusluokituksen IRI-arvorajat ovat 2 ja 3.5), luokkien 3 ja 4 epätasaisuus vaatimus kiristyisi ja luokan 2 leveys kasvaisi 70 cm/km:iin. On huomattava, että luokat 2-5 olisivat HDM:n luokituksen mukaan erinomaisessa kunnossa ja että näiden luokkien epätasaisuudella ei Patersonin mukaan ole vielä merkittävää vaikutusta ajonopeuteen.



Kuva 26. International Roughness Index IRI (Paterson 1987).



Kuva 27. Epätasaisuuden vaikutus ajonopeuksiin (Paterson 1987).

5.4 Toimenpiteen vaikutus

Toimenpiteen (höyläyksen) vaikutusta tutkittiin ennen-jälkeen-tutkimuksena tallentaen toimenpideviikkoa edeltäneen viikon kuntotila ja toimenpideviikon jälkeisen viikon tilat. Näin kerätyn aineiston avulla pyrittiin tarkastelemaan toimenpiteen vaikutusta. Kesän 1989 tiedoilla olisi mahdollista päätellä onko toimenpideviikon kunnonarviointi suoritettu ennen vai jälkeen toimenpiteen. Näin olisi ollut mahdollista verrata toimenpideviikon kuntoarvioita. Tästä kuitenkin luovuttiin toisaalta yhdenmukaisuussyistä ja toisaalta koska osalla osuuksista on tehty samalla viikolla useampia toimenpiteitä, jotka ajoittuivat sekä ennen että jälkeen kyseisen viikon kunnon arvioinnin.

5.4.1 Tasaushöyläyksen lähtökynnys

Sorateiden kunnossapito-ohjeen (TVH,1985) mukaan

hoidon tavoitteena on ylläpitää tiellä hoitoluokan edellyttämää kuntoa ja varmistaa kesäkauden aikaisen keskimääräisen kuntotavoitteen toteutuminen.

Ohjeessa annetaan edelleen liikennemääräluokille hälytysrajat, joiden alittuessa on hoitotoimenpiteeseen ryhdyttävä annetussa toimenpideajassa. Kuntotavoitteet ovat

3.4 ja 2.8 liikennemääräluokissa KKVVL yli ja alle 200. Toimenpiderajat (hälytysrajat) ovat vastaavasti 2.5 ja 2.

Kesä 1989 kuntoarvioiden perusteella ei hoito-ohjeen hälytysraja toteutunut hoitotoimenpiteen suorituksen osalta. Huomattavan monessa tapauksessa on toimenpide suoritettu ennenkuin kuntoarvion mukaan olisi ollut tarpeellista (taulukko 8). Toimenpideviikkoa edeltävän viikon epätasaisuusluvun keskiarvoissa oli alueitten välillä vuonna 1989 selvä ero: Oulun piirissä höyläystä edeltävän viikon epätasaisuus oli keskimäärin selvästi pienempi kuin Hämeessä (ero noin 80 cm/km). Vuonna 1988 oli vastaava ero keskimäärin 40 cm/km.

Taulukko 8. Kuntoarvio höyläystä edeltävällä viikolla 1989, lukumäärät.

		Tasaisuus					
		1	2	3	4	5	Yhteensä
Kiinteys	1	2	3	8	0	0	13
	2	12	32	59	22	0	125
	3	14	129	145	42	4	334
	4	4	68	48	8	0	128
Yhteensä		32	232	260	72	4	600

Toimenpiteen toimenpiderajoja soveltaen ei toimenpidettä pitäisi tehdä, jos tien kuntoarviot ovat kolme tai yli. Vuonna 1989 suoritetuista höyläyksistä edellisen viikon kiinteys ja tasaisuus olivat 41%:ssa tapauksista kolme tai yli. Tasaisuus oli kolme tai yli 56%:ssa tapauksista.

5.4.2 Höyläyksen vaikutus

Hoidon vaikutusta tutkittaessa käsiteltiin ainoastaan höyläyksen vaikutusta, koska aineistossa ei ollut muista toimenpiteistä riittävästi havaintoja. Vertailussa käytettiin toisaalta toimenpideviikkoa edeltävän ja sitä seuraavan viikon kuntoarvioita ja toisaalta epätasaisuuslukuja. Kuntoarvion perusteella suoritettussa ennen-jälkeen vertailussa yhdistettiin luokat 1 ja 5 luokkiin 2 ja 4. Näin saadun kolmiportaisen asteikon luokkia merkitään jatkossa arvoilla huono (hu, alkuperäiset luokat 1 ja 2), kohtalainen (ok, 3) ja hyvä (hy, 4 ja 5). Taulukossa I on kustakin tilasta jäljempänä käytetty koodinumero ja taulukossa II kullekin tilalle käytetty arvo (hu = 2, ok = 3, hy = 4).

Taulukko 9. Kolmiarvoisella asteikolla arvioitujen tasaisuuden ja kiinteiden kombinaatioiden koodinumerot ja arvot.

I		Tasaisuus			II		Tasaisuus		
		Hu	Ok	Hy			Hu	Ok	Hy
Kiinteys	Hu	1	2	3	Kiinteys	Hu	2	2.5	3
	Ok	4	5	6		Ok	2.5	3	3.5
	Hy	7	8	9		Hy	3	3.5	4

Tehdyssä esiselvityksessä (TVH,1988) todetaan, suoritettun Delphi-kyselyn perusteella, höyläyksen parantavan tien kuntoarvoa keskimäärin 1.3 yksiköllä. Tämän kaltaista tien kunnon paranemista ei kuitenkaan havaittu VTT:n suorittamassa arvioinnissa: höyläämällä ei kuntoa saatu kohoamaan kuin luokissa 1 ja 2 eli kun kiinteys oli ennen höyläystä 2 ja tasaisuus joko 2 tai 3. Vertailun keskiarvoja laskettaessa on käytetty edellisen taulukon tilakoodeja ja arvoja kullekin tilalle (liikennemääräluokat: I = $KKVL > 200$, II = $100 < KKVL < 200$ ja III = $KKVL < 100$, alueet: H = Häme ja O = Oulu).

Taulukko 10. Höyläyksen vaikutus kuntoarvion mukaan: jälkeen-tilan keskiarvo alueittain ja liikennemääräluokittain (1988 / 1989).

lähtötila	Alue-liikennemääräluokka					
	H I	H II	H III	O I	O II	O III
1 (2)	2.5 / 2.3	... / 2.5	... / 2.5	2.7 / 2.3	2.8 / 2.3	2.5 / 2
2 (2.5)	2.8 / 2.4	2.7 / 2.3	3 / 2.3	3 / 2.5	2.9 / 2.4	2.7 / ...
3 (3)	... / 2.2	2.9 / 2.8	2.5 / 3	... / 2.7	2.5 / 2.2	3.5 / 2.4
4 (2.5)	2.8 / 2.5	2.7 / 2.3	2 / 2.6	2.9 / 2.2	2.7 / 2.4	2.5 / 2.4
5 (3)	2.9 / 2.7	2.9 / 2.8	2.6 / 2.8	2.9 / 2.2	2.8 / 2.5	2.7 / 2.5
6 (3.5)	3.1 / 2.1	2.6 / 2.1	2.2 / 3	3 / 2.3	3 / 2.7	3 / 2.7
7 (3)	3 / 2.5	3 / 2.2	... / ...	3.2 / 2.3	2.5 / 2.2	... / 2.5
8 (3.5)	2.9 / 2.2	2.9 / 2.5	2.5 / 3	2.8 / 2.3	2.8 / 2.9	3 / 2.8
9 (4)	3.2 / 2.5	2.6 / ...	2.3 / ...	2.5 / 3	2.5 / 2.5	3 / 3

5.5 Epätasaisuusluvun analyysi

5.5.1 Höyläyksen vaikutus

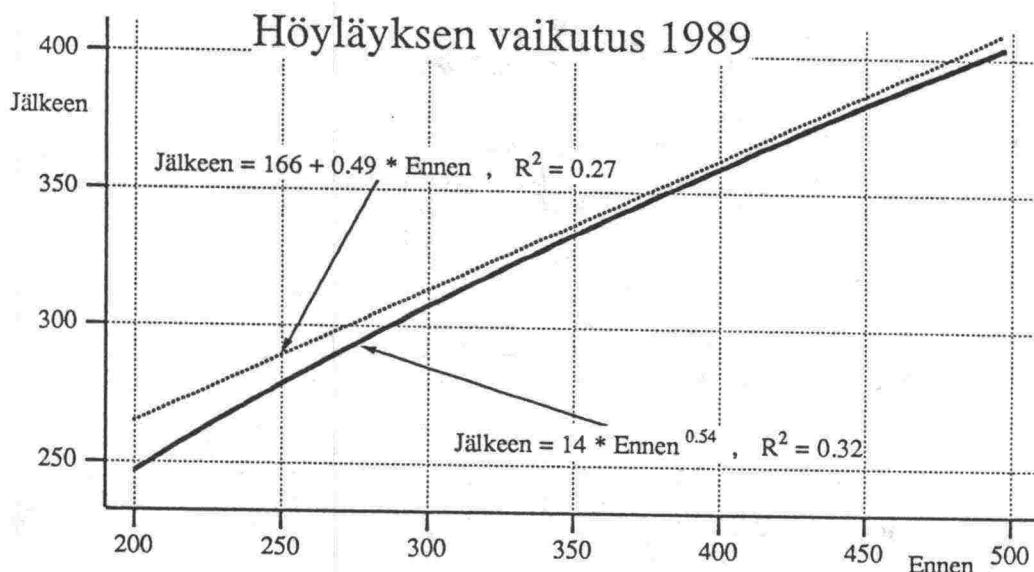
Epätasaisuusluvun mukaan höyläyksen vaikutusta estimoitiin Patersonin (1987) tavoin eksponentti-muotoisella funktiolla $A_1 = \exp(\alpha_0 + \sum \alpha_i X_i) B^\beta$ sekä myös ennen-tilanteen suhteen lineaarisella polynomilla $A_2 = \alpha_0 + \sum \alpha_i X_i + \beta B$. Estimointi suoritettiin askeltavalla lineaarisella regressiolla. Ensimmäisenä selittäjänä malliin tuli kummassakin tapauksessa ennen-tilanteen epätasaisuus. Selitysteiden ollessa 0.32 eksponentti-muotoiselle ja 0.27 lineaariselle mallille:

Eksponentti-funktio $A_1 = \alpha_0 B^\beta$:

$$\text{Jälkeen epätasaisuus} = 14 * (\text{ennen epätasaisuus})^{0.54} \quad (10)$$

Lineaarinen funktio $A_2 = \alpha_0 + \beta B$:

$$\text{Jälkeen epätasaisuus} = 166 + 0.49 * (\text{ennen epätasaisuus}) \quad (11)$$



Kuva 28. Höyläyksen jälkeisen viikon epätasaisuus edeltävän viikon epätasaisuudella selitettynä.

Kolmen selittäjän malliin selittäjiksi X_i tuli kummassakin tapauksessa mukaan ennen tilanteen lisäksi metsäisyysprosentti ja kuukauden keskimääräinen sademäärä. Näin estimoidut mallit olivat (havaintoja A_1 1175 kappaletta ja A_2 1181):

	A_1		A_2	
	kerroin	$R^2 = 0.33$ hajonta	kerroin	$R^2 = 0.29$ hajonta
α_0	2.90	0.153	210.9	15.13
Metsäisyys	0.00053	0.00012	0.152	0.044
Sade	-0.0013	0.0004	-0.544	0.133
Ennen (β)	0.508	0.024	0.449	0.024

5.5.2 Alin havaittu epätasaisuus

Kesän alinta havaittua epätasaisuutta saatiin selitettyä hiukan ($R^2 = 0.13$, havaintoja 880) käyttäen selittäjinä kesän liikennemäärää [ajon/vrk], metsäisyyttä [%], pehmeikköjen määrää [m^2 /osuus (500m)], sademäärää [mm/kk], kevätkantavuutta [MN] ajoradan leveyttä [m] ja kahta dummy-muuttujaa: alue ja kk2 l. ohuin havaittu kulutuskerrospaksuus alle 2 cm:

muuttuja	kerroin	hajonta	t
vakio	202.0	18.96	10.65
KKVL	0.062	0.011	5.42
metsäisyys	-0.093	0.047	-1.95
pehmeiköt	0.025	0.007	3.17
sade	0.424	0.084	5.0
kevätkantavuus	0.156	0.046	3.37
ajoradan leveys	0.544	0.315	1.72
alue: Häme	15.87	4.12	3.85
alue: Oulu	0
kk2: yli 2 cm	-10.88	6.37	-1.17
kk2: alle 2 cm	0

5.5.3 Kesän epätasaisuuskeskiarvo

Tutkimuksessa pyrittiin muodostamaan malli kesän keskimääräisen epätasaisuuden arvioimiseksi. Keskiarvo laskettiin viikoilta, jolla ei oltu tehty toimenpiteitä. Tehdyissä mallinsovituksissa pyrittiin löytämään malli, joka kuvasi koko aineistoa sekä alueille erikseen. Koko aineistosta estimoidun mallin selityssaste R^2 oli 0.64:

Taulukko 11. Kesän keskimääräinen epätasaisuus.

Muuttuja	kerroin	hajonta	t
vakio	176.4	10.51	16.78
alue: Häme	27.61	3.14	8.87
alue: Oulu	0
KKVL	0.011	0.0091	1.15
Sade	-0.234	0.088	-2.64
Höyläyskerrat	1.83	1.10	1.66
Min epätasaisuus	0.551	0.03	18.1
Kaarteisuus	0.065	0.02	3.23

Edellä olevassa taulukossa minimiepätasaisuus on kunkin osuuden kesän alin epätasaisuuslukema. Sademäärä vaihteli 56 mm/kk:sta 128 mm/kk:ssa ja alin havaittu epätasaisuus oli normaalisti yli 200 cm/km. Tiellä, jonka KKVL on 100, saadaan kesän epätasaisuuskeskiarvoksi Hämeessä vähintään 274 ja Oulussa 247

cm/km. Kuten havaitaan liikennemäärän (KKVL) kertoimesta ja t-arvosta ei liikennemäärä ole merkitsevä tässä mallissa.

Alueittain tehdyissä mallin sovituksissa tuli Hämeen malliin mukaan selittäjäksi mäkisyys ja Oulun malliin jäi epätasaisuutta selittämään vain liikennemäärä, sade ja alin havaittu epätasaisuus. Selitysasteet olivat malleille Häme 0.72 ja Oulu 0.33.

Taulukko 12. Hämeen kesän epätasaisuuskeskiarvo.

Muuttuja	kerroin	hajonta	t
vakio	214.53	14.82	14.48
KKVL	0.0236	0.010	2.24
Sade	-0.350	0.116	-3.03
Höyläyskerrat	3.97	1.61	2.47
Min epätasaisuus	0.5678	0.041	13.84
Kaarteisuus	-1.284	0.333	-3.85
Mäkisyys	0.193	0.034	5.65

Taulukko 13. Oulun kesän epätasaisuuskeskiarvo.

Muuttuja	kerroin	hajonta	t
vakio	237.6	15.14	15.69
KKVL	0.028	0.012	2.17
Sade	-0.388	0.141	-2.75
Min epätasaisuus	0.404	0.0249	16.2

Samoin oletuksin kuin kokoaineiston mallilla laskettuna saadaan alueittaisilla malleilla kesän keskiarvoksi Hämeessä vähintään 283 ja Oulussa 271 cm/km (havaitut keskiarvojen keskiarvot 370 ja 320 cm/km).

5.5.4 Epätasaisuuskeskiarvo toimenpiteettömällä jaksolla

Toimenpiteettömän jakson epätasaisuuskeskiarvoa pyrittiin estimoimaan erottamalla mittaustuloksista jaksot, joilla tielle ei oltu tehty mitään toimenpiteitä. Näiltä jaksoilta laskettiin keskiarvoepätasaisuus, jota pyrittiin selittämään koeosuuden olosuhteilla. Lineaaraisella askeltavalla regressioanalyysillä estimoitiin sekä eksponenttimuotoinen että lineaarinen funktio. Havaintoja oli yhteensä 1778. Mukana mallissa on kaksi dummy-muuttujaa: alue10 ja kk20. Alue10 saa arvon 1 Oulun alueella ja Hämeessä sen arvo on 0. Muuttuja kk20 saa arvon 1, jos osuudelta on tehty

havainto 2 cm:ä ohuemmasta kulutuskerrospaksuudesta ja muulloin sen arvo on 0. Estimoitu lineaarinen malli on ($R^2=0.14$):

Taulukko 14. Toimenpiteettömien jaksojen keskimääräinen epätasaisuus.

Muuttuja	kerroin	hajonta	t
vakio	250.3	8.04	31.1
alkuepätasaisuus	0.265	0.021	12.6
kumulatiivinen liikennemäärä	0.00147	0.00024	6.1
Alue10	-16.28	3.1	-5.25
KK20	22.54	4.23	5.3

Höyläyksen jälkeinen epätasaisuus oli vuonna 1989 tyypillisesti välillä 290-330 cm/km. Tästä saadaan keskimääräiseksi epätasaisuudeksi siten 327-337 cm/km. Liikennemäärätermin vaikutus on varsin vähäinen: KKVVL 100-tiellä n. 1 cm/km /vko.

5.6 Kulutuskerrosmateriaalin hävikki

Tutkimuksen aikana epäiltiin ettei kulutuskerroksen paksuuden mittaustarkkuus riitä millimettiluokkaa olevien kulumien havaitsemiseksi. Vertaamalla vuoden 1988 kevään ja syksyn sekä vuosien 1988 ja 1989 mittaustuloksia keskenään voitiin todeta ettei trendiä ollut suoraan havaittavissa. Regressioanalyysillä koetettiin kuitenkin selittää vuoden 1988 kevään ja syksyn mittausten eroa. Ero = {kevään paksuus} - {syksyyn paksuus}, joten kulumisen pitäisi johtaa positiiviseen erotukseen. Mallin tuli 5% riskirajalla 5 muuttujaa ja selitysasteeksi 0.28. Mallin ongelma on, että mallilla laskettu erotus l. kesäaikainen kuluminen tuli negatiiviseksi eli kerrospaksuus kasvoi kesän aikana. Tulosta voinee selittää epätarkkuudella mittaustapahtumassa ja hoitotoimenpiteiden sekä liikenteen aiheuttamalla materiaalin kulkeutumisella. Mielenkiintoista mallissa oli muuttujien kerrointen etumerkit. Positiivisen etumerkin saivat eli kuluma kasvaa höyläyskertojen lukumäärän, kevään kerrospaksuuden ja alue-dummin (Oulu = 1) myötä. Negatiivisen kertoimen saivat sademäärän ja raskaanliikenteen määrän tulo ja lisäsuolauskertojen lukumäärä (vert. Paterson).

Taulukko 15. Kulutuskerroksen paksuuden muutos vuonna 1988.

Muuttuja	kerroin	hajonta	t
vakio	-3.78	0.48	-7.8
höyläyskertojen lukumäärä	0.63	0.12	5.2
lisäsuolauskertojen lukumäärä	-0.47	0.16	-2.9
Kevään kerrospaksuus	0.3	0.018	16.7
Alue10	0.74	0.33	2.2
Sademäärä*raskaanliikenteenmäärä	-0.001	0.00018	-5.5

5.7 Mittausten arviointi

Tässä luvussa tarkasteltiin koeteiden kunnon vaihteluita ja höyläyksen suorittamista kuntoarvion ja epätasaisuusluvun perusteella.

Kuntoarvio (kuntoarvo) näyttää olevan varsin huono tilan kuvaaja järjestelmien perustaksi. Arvio vaihtelee samallakin arvioijalla (verrattuna mitattuun epätasaisuuteen). Oman työn arviointi on todettu olevan hankalaa ja nykykäytäntökin rohkaisee tiemestareita arvioimaan tiestönsä kuntoa tavoitekeskiarvopainotteisesti. Tärkeimmiksi osatekijöiksi katsottujen kiinteyden ja tasaisuuden arvioinnissa oli VTT:n arvioihin verrattaessa selkeä ero: tiemestarien kannalta vähemmän tärkeänä pidetyn kiinteyden arviot erosivat VTT:n arvioista keskimäärin enemmän kuin tasaisuuden arviot. Kiinteysarvion pienempi paino on 'sisään rakennettuna' arviointiohjeessa (TVH,1986): kiinteyttä ei ole erikseen tarkasti kuvattu kuntoluokissa 1 ja 2. Mikäli kuntoarviota käytetään perusteena rahan jaossa, johtaa keskiarvohakuinen arviointi virheelliseen jakaumaan.

Epätasaisuusmittaus on kallis ja erityisen laitteen vaativa mittaus. Tässä tutkimuksessa ei saatu tietoa mittauksen toistettavuudesta. Pomppumittarilla mitattuun tulokseen vaikuttaa myös tienpinnan pehmeys (kosteus), josta ei tutkimuksessa kerätty riittävää tietoa. Epätasaisuusluku on käytetyistä kunnon mittareista vertailukelpoinen.

Kantavuuden mittaus sorateillä on epävarma ja toistettavuus erittäin kyseenalainen. *Kevätkantavuuskertoimen* arviointi on kolmiluokkaisena tietona helppo arvioida kunhan ohjeet ovat riittävän selkeät.

Kulutuskerroksen paksuus on toimenpiteiden kannalta tärkeä muuttuja. Paksuuden mittaaminen on helppo suorittaa, mutta mittauksen toistettavuus on kyseenalainen ja mittaustarkkuus ei riitä millimetrituokkaa olevan vuotuisen kulumisen mittaamiseksi. Koska perustoimenpiteet, muokkaushöyläys ja tasaushöyläys, muokkaavat kulutuskerrosta varsin perusteellisesti, on oletettavissa että tällöin myös kulutuskerroksen paksuus vaihtuu.

Kulutuskerroksen suhteistus mitataan seulomalla materiaalinäyte. Seulontamenetelmät ovat yleisesti käytettyjä. On esitetty epäilyjä, että seulonnan tarkkuus vaihtelisi huomattavasti. Seulonta on työläs ja siten kallis toimenpide.

Kuivatuksen inventoinnista ei tässä tutkimuksessa ole kokemuksia.

Tienrungon vaurioiden arvioiminen on periaatteessa yksinkertainen toimenpide. Arvioinnin ajoituksesta on kuitenkin syytä antaa selkeät ohjeet. Vaurioiden tarkka arviointi auttaa tiemestareita toiminnan suunnittelussa jo ennenkuin soratiestön hallintajärjestelmät on saatu käyttöön.

Toimenpideseurantaa ei normaalisti suoriteta edes tiekohtaisesti, joten jälkeenkään ei voida tutkia toimenpiteiden vaikutusta. Tämän tutkimuksen aikana tiemestarit kirjassivat suoritettamansa toimenpiteet kyltin tarkkuudella. Täysin varmasti ei näinollen voida tietää oliko esimerkiksi höyläys suoritettu kyltin kaikilla osuuksilla. Suoritetuissa analyyseissä jouduttiin oletamaan, että kaikki osuudet käsiteltiin samalla tavalla. Oletuksesta aiheutuvaa virhettä on vaikea arvioida. Jos toimenpiteet on suoritettu ohjeitten mukaan, ei kunnossa olevia osuuksia höylätty ja tehty oletus aiheuttaa siten virhettä huonompaan suuntaan. Todennäköisesti käytännössä koko tie höylätään kerrallaan, joten tehty oletus ei liene väärä.

Metsäisyyden arviointi tarvittavalla tarkkuudella ei liene ongelma. Ongelma on sen sijaan metsäisyysprosentin muuttuminen muiden kuin tienpitäjän toimenpitein.

Sorateiltä käytettiin *tierekisteri*- tietoina liikennemäärää, päällystystietoa, tien leveyttä ja geometriatietoja. Tieräkisterin käytön ongelma on sen tietojen puutteellisuus ja päivitys.

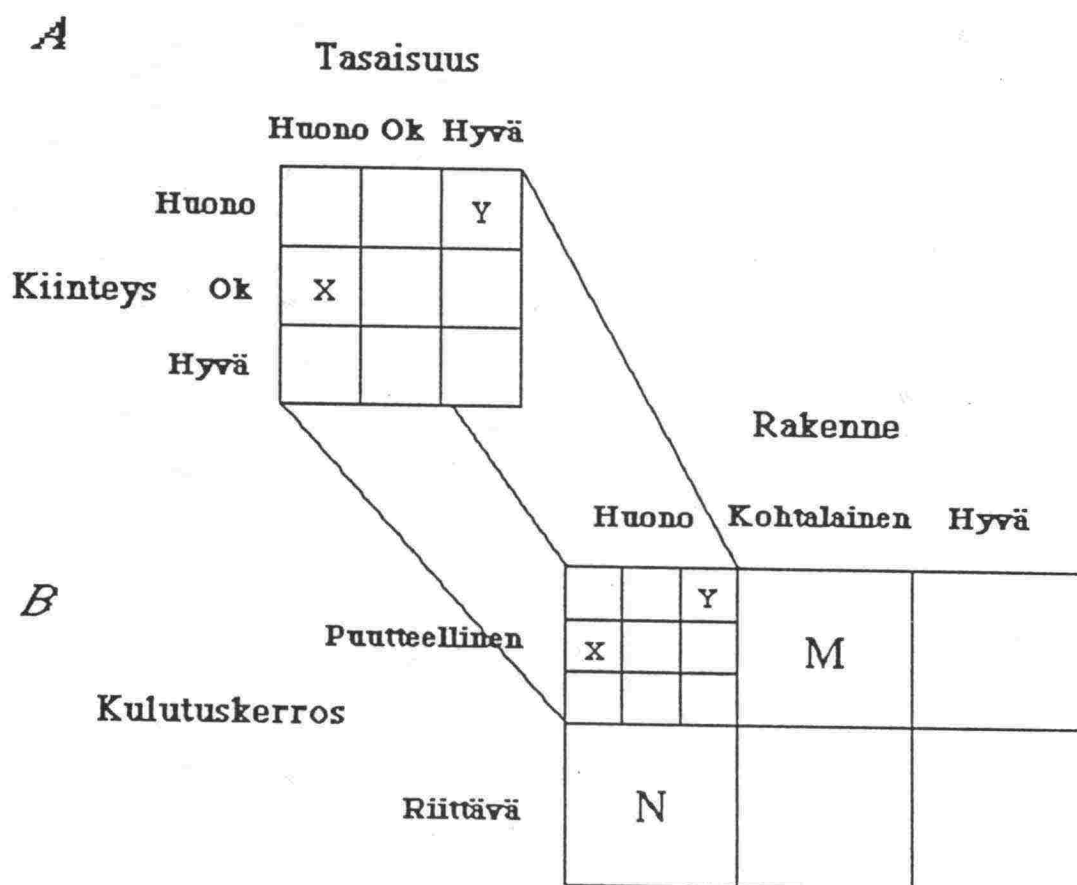
Liikennemäärä lasketaan myös sorateiltä normaalin käytännön mukaan ja tiedon paikkansapitävyyttä ei ole syytä tässä arvioida.

6. Soratien mallit

Sorateiden kunnossapitoa päätettiin kuvata semi-markovin prosesseilla. Mallin määrittelevät tien mahdolliset *tilat*, tilansiirtoon liittyvät *todennäköisyydet* sekä tiloihin ja siirtymisiin liittyvät *kustannukset*. Malli jakaantuu kahteen osaan: *hoidon* ja *kunnostuksen* optimointiin.

Soratien hoitomallissa pyritään toisaalta optimoimaan tien kesähoidon suorittamista ja toisaalta löytämään vaihtoehtoïsille hoitostrategioille kustannukset. Prosessin eli siis tien tiloiksi valitaan tien kuntoarvion mukaiset tilat. Esiselvityksen mukaan (Viatek & al., 1988) tien tilaa kuvaaviksi muuttujiksi valitaan toimenpiteen valinnan kannalta kuntoarvon osatekijöistä tärkeimmät — tasaisuus ja kiinteys (pölyävyyttä ei tässä käsitellä lainkaan). Esiselvityksen, FUG-tutkimuksen suositusten ja mittausaineiston analysoinnin (luku 5) perusteella päädyttiin käyttämän kummallakin muuttujalla vain kolmea arvoa. Näin ollen soratien kunto on jokin $3 \times 3 = 9$:stä mahdollisesta. Mahdollisia toimenpiteitä ovat hoitotoimenpiteet ja ei tehdä mitään-vaihtoehto. Kustannuksina käytetään Ajokustannukset- ja Kunnossapitotilasto-julkaisujen antamia kustannuksia.

Kunnostusmallilla pyritään optimoimaan tiestölle tehtäviä kunnostustoimenpiteitä. Tietä kuvaaviksi muuttujiksi valitaan kulutuserroksen paksuus ja tien rakenneindeksi. Kulutuserros-muuttujalle määrätään kaksi luokkaa: riittävä ja puutteellinen ja rakenneindeksille kolme: hyvä, kohtalainen ja huono.



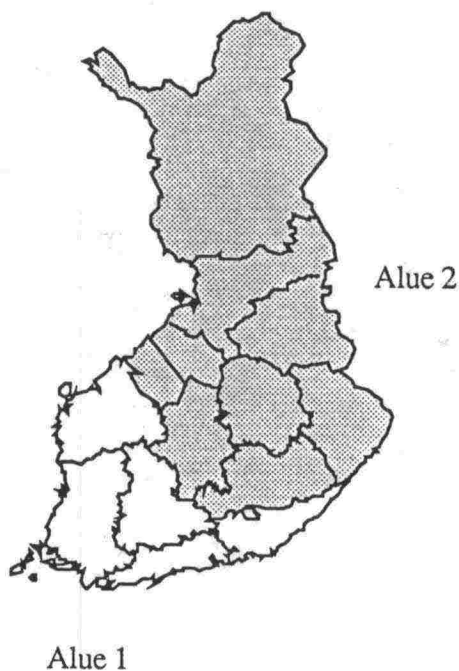
Kuva 29. Soratie-mallin tilat.

Optimointi tapahtuu kahdessa vaiheessa:

1. Vaihe: Olettaen vakiotilan olemassaolo haetaan lineaarisella ohjelmoinnilla optimaalinen kuntotilajakauma ja hoitotoimenpiteet kuhunkin kuntotilaan. Vaihtoehtoisten strategioiden tilajakauma ja kustannukset lasketaan dynaamisella ohjelmoinnilla. Kuntotilajakaumat ja kustannukset ratkaistaan erikseen kullekin kulutuskerros/rakenne-luokalle.
2. Vaihe: Haetaan lineaarisella ohjelmoinnilla optimaaliset toimenpiteet ja kulutuskerros/rakenne-tilajakauma. Toimenpiteinä tässä vaiheessa ovat kunnostustöiden ja eri hoitostrategioiden yhdistelmät (esimerkiksi höyläys kerran kuussa kesäaikana ja syyssorastus).

6.1 Mallin taustamuuttujat

Alustavaan malliin mahdollisista taustamuuttujista otetaan mukaan vain liikennemäärä ja alue. Aluejako kahteen perustuu tietoihin sulan kauden pituudesta eri puolilla Suomea sovellettuna tielaitoksen piirijakoon. Jako noudattaa aiemmin päällystettyjen teiden järjestelmissä tehtyä jakoa kahteen alueeseen: Alueeseen I kuuluvat Uudenmaan, Turun, Kymen, Hämeen ja Vaasan tiepiirit ja alueeseen II muut tiepiirit.



Kuva 30. Soratiestön aluejako.

Kesän keskivuorokausiliikennemäärän (KKVL) mukaan tiet jaetaan kolmeen luokkaan. Luokkien liikennemääräarvona käytetään tiepituudella painotettuja luokkakeskisarvoja.

Taulukko 16. Tiepituudet taustamuuttujaluokittain [km] (Tierekisteri 1.1.1989).

liikennemäärä- luokka (KKVL)	Alue I	Alue II	Yhteensä
yli 200 (I)	2 131	3 397	5 528
100-200 (II)	4 238	8 026	12 264
alle 100 (III)	3 847	10 127	13 974
Yhteensä	10 216	21 550	31 766

Liikennemäärätieto puuttuu yhteensä 54 kilometriltä.

Taulukko 17. Liikennemäärä keskiarvot (KKVL) luokittain: kevyet · raskaat ajoneuvot (Tierekisteri 1.1.1989).

liikennemäärä- luokka (KKVL)	Alue	
	I	II
yli 200 (I)	314.9 · 22.1	298.7 · 21.6
100-200 (II)	135.7 · 10.5	134.3 · 9.6
alle 100 (III)	67.3 · 4.9	63.9 · 5.4

Tien geometria jätettiin tässä vaiheessa pois mallista. Pois jättäminen johtuu sorateiden geometriatietojen puutteellisuudesta. Kun saatavilla on riittävästi geometriatietoa voidaan tiegeometrian (hyvä/puutteellinen) luokitusperusteena käyttää laskennallista tai tienopeutta (OECD 1990). Nopeuden laskentakaavana voitaisiin käyttää esimerkiksi julkaisussa Ajoanalysaattoritutkimuksia 1/81 (TVH, 1981) esitettyä kaavaa tai vastaavaa.

Taulukko 18. Geometriatietojen saatavuus sorateilla [km] (Tierekisteri 1.1.1990).

KKVL - luokka	Alue I		Alue II	
	Ei tietoja	Mitattu	Ei tietoja	Mitattu
alle 100	2732	400	6000	794
100-200	3807	848	5518	1722
yli 200	2600	1414	2814	2595
Yhteensä	9139	2662	14332	5111

6.2 Kesähoidon optimointi

Kesähoidon optimoinnilla pyritään löytämään optimaalinen kuntojakauma soratiestölle. Peruslähtökohta oli, että toimenpiteitä tekemällä voidaan tietty kuntotaso saavuttaa. Tutkimusten mukaan ainoastaan höyläyksellä on vaikutusta tien kuntoon (Jóhannesson & al., 1984 ja TVH, 1985c, joissa arvosteluperusteena käytettiin arvioitua kuntoa). Niinpä tässä työssä keskityttiin pelkästään höyläykseen. Ratkaisua puoltaa myös liian pieni havaintomäärä muista toimenpiteistä.

6.2.1 Tilat

Kunnon arvioinnissa käytössä olevan viisi-luokkaisen jaon sijaan mallissa päätettiin käyttää kolmiluokkaista jakoa huono-kohtalainen (=ok) -hyvä siten, että luokkaan huono yhdistettiin kuntoarvion luokat 1 ja 2 sekä luokkaan hyvä luokat 4 ja 5.

6.2.2 Kustannukset

Tienkäyttäjän kustannuksina käytetään TVH:n vuosittain julkaiseman Ajokustannukset 1989-julkaisun (TVH, 1989) antamia kustannuksia. Kustannukset eri liikennemääräluokissa ja kuntotiloissa saadaan käyttämällä em. julkaisun ilmoittamia kustannusfunktioita sekä korjauskertoimia.

Tien kunnon ja geometrian vaikutuksesta ajonopeuksiin ei ole olemassa tutkittua Suomen olosuhteisiin soveltuvaa tietoa. FUG-tutkimuksen (Jóhannesson & al., 1984) mukaan polttoaineen kulumiseen ei vaikuta niinkään tasaisuus vaan kiinteys. Tasaisuuden vaikutus tulee esiin vasta kun epätasaisuus pakottaa laskemaan ajonopeuksia. Tässä tutkimuksessa tienkäyttäjien kustannuksien arvioimisessa käytetään Ajokustannus-julkaisun kustannusfunktioita siten, että tasaisuuden

vaikutus huomioidaan ajonopeuksina ja kiinteyden vaikutusta huomioidaan korjauskertoimin. Eri tasaisuusluokkien keskinopeuksille käytetään asiantuntija-arvioita seuraavan taulukon mukaisesti:

Taulukko 19. Referenssinopeus eri tasaisuusarvoilla liikennemääräluokittain [km/h].

		Tasaisuus		
		huono	Ok	Hyvä
Liikennemäärä	I	50	70	80
	II	50	60	70
	III	40	50	60

Taulukkoa muodostettaessa on tehty oletus, että 'vapaa'-nopeus (nopeus tasaisuudella hyvä) riippuu jossain määrin tien liikennemääräluokasta.

Näitä referenssinopeuksia käyttäen saadaan ajokustannusjulkaisusta kuhunkin luokkaan ajoneuvokustannus, jota korjataan kertoimella kiinteyden huomioimiseksi. FUG-tutkimuksen mukaan huono tienpinnan kiinteys saattaa nostaa polttoaineen kulutusta jopa 30% verrattuna kiinteään ja tasaiseen pintaan.

Taulukko 20. Ajoneuvokustannusten korjauskerroin kiinteyden mukaan

	Kiinteys		
	Huono	Ok	Hyvä
Kerroin	1.3	1.1	1.0

Käyttäen korjattuja ajoneuvokustannuksia ja Ajokustannukset-julkaisun aika- ja onnettomuuskustannuksia (nopeuden funktioita) saadaan tienkäyttäjän ajokustannuksiksi eri liikennemäärä- ja kuntoluokissa seuraavien taulukkojen ilmoittamat ajokustannukset:

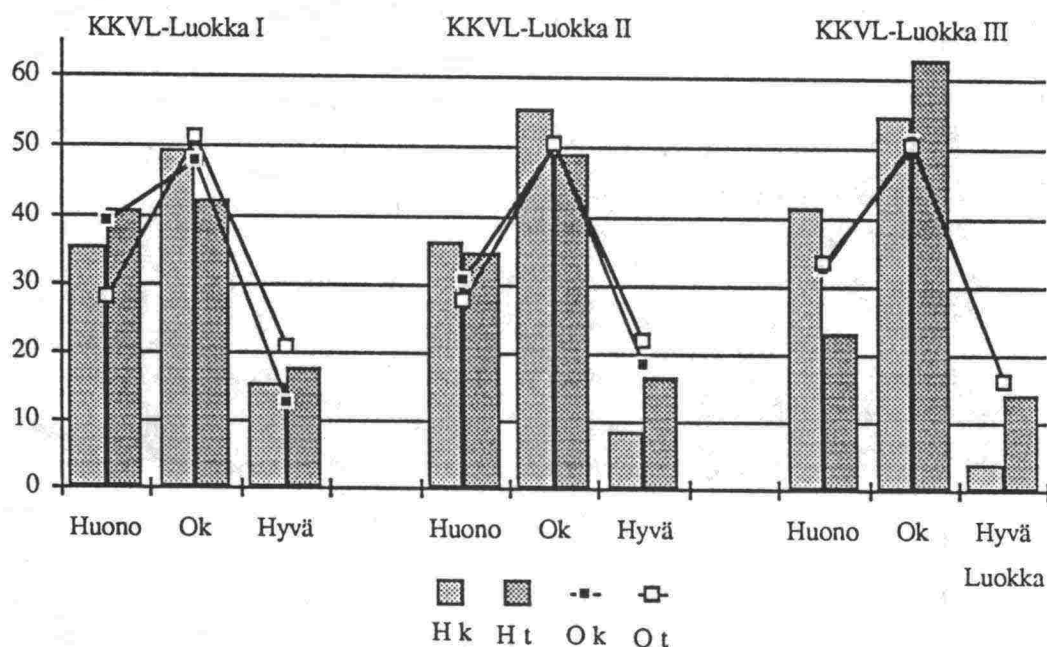
Taulukko 21. Tienkäyttäjän ajokustannukset eri kuntotiloissa kevyet ajoneuvot KKVL I-II-III [p/km].

		tasaisuus		
kiinteys		Huono	Ok	Hyvä
Huono	I	214	214	187
	II	191	214	191
	III	200	235	200
Ok	I	191	170	165
	II	191	178	170
	III	212	191	178
Hyvä	I	180	159	154
	II	180	167	159
	III	200	180	167

Taulukko 22. Tienkäyttäjän ajokustannukset eri kuntotiloissa raskaat ajoneuvot KKVL I-II-III [p/km].

		tasaisuus		
kiinteys		Huono	Ok	Hyvä
Huono	I	646	575	570
	II	646	600	575
	III	720	646	600
Ok	I	577	507	501
	II	577	532	507
	III	648	577	532
Hyvä	I	542	473	467
	II	542	498	473
	III	612	542	498

Tienpitäjän kustannuksina tutkimuksessa käytetään kunnossapitotilaston vuodelta 1987 ilmoittamia kustannuksia (TVH, 1987). Tässä työssä hoito- ja kunnostustoimenpiteiden yksikköhinnat oletetaan riippumattomiksi taustamuuttujien arvoista (alue, kkvl-luokka) ja kustannuksina käytetään koko maan keskiarvoja. Todellisuudessa piirien yksikkökustannusten välillä on eroja.



Kuva 32. Vuonna 1989 toteutuneet kiinteys ja tasaisuusjakaumat. Hk: Häme kiinteys, Ht: Häme tasaisuus, Ok: Oulu kiinteys, Ot: Oulu tasaisuus.

6.3 Kunnostustöiden optimointi

Esiselvityksessä (Viatek & al., 1988) todettiin kunnostuksen optimoinnissa käytettävän kahta tien tilaa kuvaavaa muuttujaa. Kulutuskerrospaksuutta ja rakenneindeksiä.

Kulutuskerroksen paksuuden luokittelulle voidaan esittää luontevasti paksuusrajat: 2 cm ja 5 cm. Hoitotoimenpiteet (höyläys) vaativat onnistuakseen riittävän paksun kerroksen. Nyrkkisääntönä on käytetty minimipaksuutena 1.5 kertaa suurin raekoko ($1.5 \cdot 16 \text{ mm} = 22.5 \text{ mm}$). Tällöin höyläyksessä irronneet kivet voivat vielä kiinnittyä takaisin kerrokseen. Sorastusohjeissa puolestaan esitetään materiaalia lisättävän siten, että kerrospaksuudeksi tulee 5 cm. Yli 5 cm paksussa kerroksessa on kerroksen toiminnan kannalta turhaa materiaalia.

Saadut kokemukset kulutuskerroksen paksuuden mittaamisesta ja mittauksen tarkkuudesta eivät puolla tarkkaa jakoa kolmeen luokkaan. Parempi vaihtoehto lienee luokitella kulutuskerros kahteen luokkaan riittävä ja puutteellinen kerros.

Luokituskriteeriksi voidaan toki valita tietty, mitattu kerrospaksuus, mutta myös asiantuntemukseen perustuva tieto (kuten tiehöyläkuljettajan havainnot).

Rakenneindeksi on ollut ja on edelleen ongelma. Indeksien muodostaminen ja luokittelu mahdollistaa verkkotasolla optimoinnin, mikäli luokkiin voidaan sitoa kustannukset (sekä tienpitäjän että tien käyttäjän) ja luokan muutoksiin tarvittavat työmäärät.

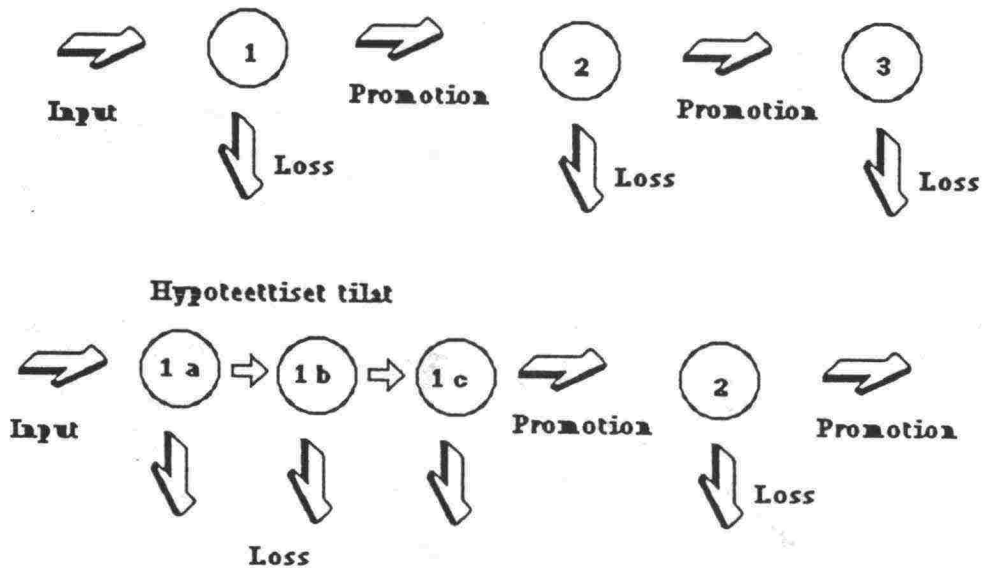
Ehdotus indeksiksi on liitteessä I. Tässä ehdotuksessa indeksi on eksponenttimuotoinen vauriotiedoista laskettava funktio. Rakennetta vaurioindeksillä kuvatessa rakenteentila muuttuu (pääosin) toimenpiteiden avulla sekä ajan, liikenteen ja sään vaikutuksesta.

Kunnostusmallilla säästöjä voidaan olettaa saatavan käyttäjän kustannuksista, mikäli tien keskimääräinen kunto ja tietyn tason ylläpitämiseksi tarvittavat toimenpiteet voidaan arvioida kulutuskerros/rakenteentila-matriisin soluissa. Tämä kustannusten ja kunnan yhteys tien tilaan ja tilasiirrot kunnostusmatriisissa jäävät ratkaistavaksi myöhemmin.

6.3.1 HIPS-ohjelmiston käyttö soratiemallissa

HIPS-ohjelmiston mallit perustuvat Markovin prosesseihin. Tällöin jokaisen tilasiirron kesto oletetaan olevan yksi vuosi. Markovin prosessien käytöstä seuraa, että mallin tiloissa pysymisajan jakaumat ovat geometrisiä jakaumia. Keskeinen Markovin prosessien ominaisuus on prosessin muistittomuus: tilassa aiemmin vietetty aika ei vaikuta tilasta siirtymistodennäköisyyksiin. Jos tilassa vietetty aika halutaan huomioida on käytettävä tilassapysymisajalle toisenlaisia jakaumia eli siis semi-markovin prosesseja.

HIPS-ohjelmisto on rakennettu käsittelemään 135 soluisia matriiseja. Periaatteessa sorateiden kunnossapitomalli (2×3 matriisi) mahtuu siis pyörimään HIPS-ohjelmalla. Haluttu ikäkäyttäytyminen voidaan ottaa mukaan malliin muodostamalla välitiloja (Bartholomew, 1982): Siirtyäkseen tilasta 1 tilaan 2 on prosessin käytävä läpi välitilat 1a, 1b ja 1c (tässä esimerkiksi kolme tilaa).



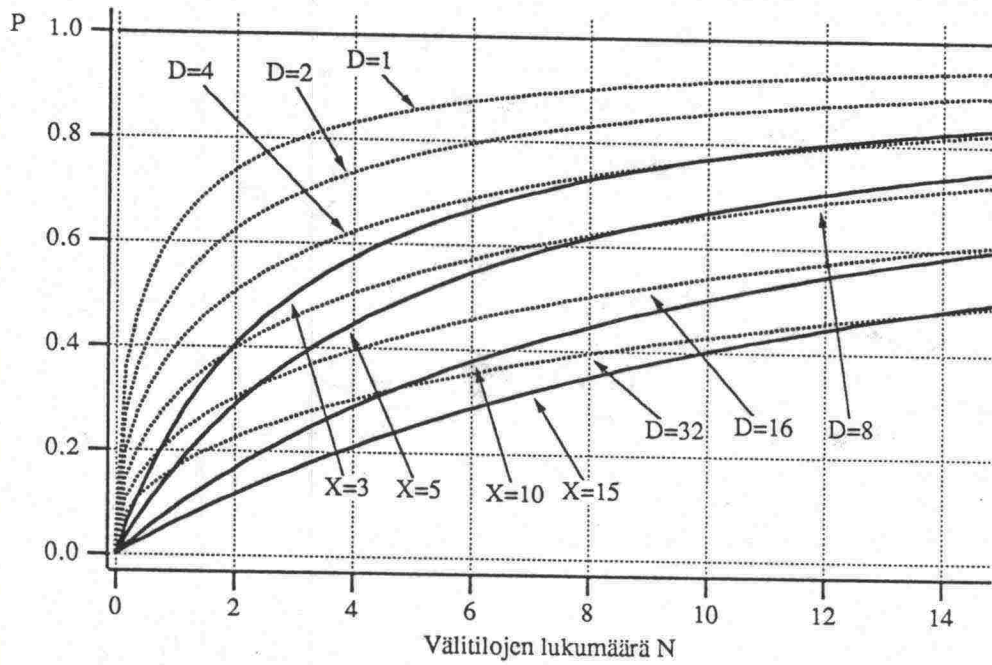
Kuva 33. Hypoteettiset tilat (Bartholomew, 1982).

Tilassa 1 pysymisaika on nyt aika, jonka prosessi viettää yhteensä tiloissa 1a, 1b ja 1c ennen siirtymistään tilaan 2. Muodostettuja välitiloja käsitellään kuten normaaleja markovin prosessin tiloja vakio siirtotodennäköisyyksineen. Alkuperäisen tilan 1 tilassapysymisaika T_1 on siis toisistaan riippumattomien satunnaisten aikojen T_a, T_b ja T_c summa. Jos valitaan välitiloista siirtymistodennäköisyydet yhtä suuriksi $=p$, on välitilassa pysymisajan odotusarvo $(1-p)/p$ (geometrinen jakauma) ja $n:n$ välitilan systeemissä pysymisajan odotusarvo $n(1-p)/p$. Varianssit ovat vastaavasti yhdelle tilalle $(1-p)/p^2$ ja $n:n$ välitilan systeemille $n(1-p)/p^2$. Kun tunnetaan halutun (Pascal-) jakauman odotusarvo ja varianssi voidaan tarvittavien välitilojen lukumäärä ja siirtotodennäköisyys laskea odotusarvon ja varianssin lausekkeista (Cooper, 1977).

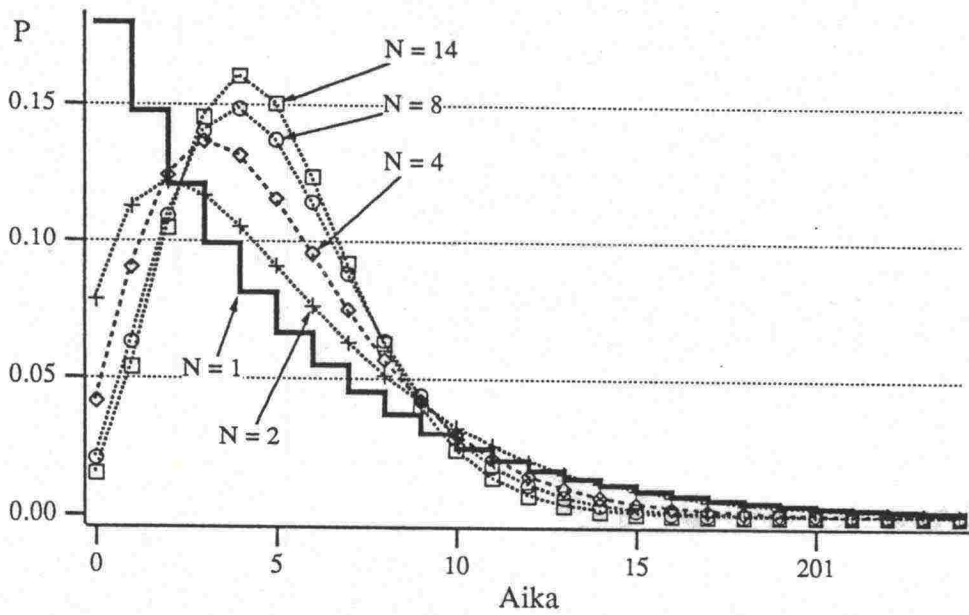
Olkoon X haluttu odotusarvo, D varianssi, p siirtotodennäköisyys välitiloista toiseen ja N välitilojen lukumäärä. Tällöin pätee:

$$X = \frac{n(1-p)}{p} \quad \text{ja} \quad D = \frac{n(1-p)}{p^2}$$

$$\Rightarrow \quad p = \frac{n}{X+n} \quad \text{ja} \quad p = \frac{-n}{2D} + \left[\left(\frac{n}{2D} \right)^2 + \frac{n}{D} \right]^{0.5} . \quad (12)$$



Kuva 34. Välitilojen lukumäärän (N) ja siirtotodennäköisyyksien (p) suhde alkuperäisiin tilassapysymisajan odotusarvoon (X) ja varianssiin (D).



Kuva 35. Pascal-jakaumat $P(t) = \binom{N+t-1}{t} (1-p)^t p^N$ odotusarvolla $t=5$, parametreinä (N, p) : $(1, 0.18)$, $(2, 0.28)$, $(4, 0.45)$, $(8, 0.61)$ ja $(14, 0.74)$.

Kuten kuvista havaitaan on Markovin prosessien (jollainen on myös välitila-malli) ongelmana jakauman hajonnan kasvu tehtyjen siirtojen määrän kasvaessa (Trivedi & al., 1987).

Kunnostusmallin jatkokehittelyyn ja HIPSin 2. version käytössä testattavaksi jää onko tämä välitilamallin ongelma merkittävä.

7. Päätelmät

7.1 Tulosten arviointi

Useista toteutetuista päällystetyn tiestön ylläpidon hallintajärjestelmistä on eri puolilla maailmaa saatu hyviä kokemuksia. Ottaen huomioon sorateiden vähäiseen liikennesuoritteeseen nähden suuret ylläpitokustannukset on myös sorateiden hallintajärjestelmälle sosiaalinen tilaus. Markovin prosesseihin perustuvasta HIPS-järjestelmästä saatujen kokemusten perusteella pyrittiin myös sorateille kehittämään saman kaltaista mallia.

Kesien 1988 ja 1989 aikana suoritettiin Hämeen ja Oulun piirissä koetieverkon kunnon ja toimenpiteiden seuranta. Saadut tulokset osoittavat ettei kulutuskerroksen kuntoarvo nykyisellään soveltune hallintajärjestelmien perustaksi. Käyttökelpoisuuden lisäämiseksi olisi syytä muuttaa ainakin käytäntöä, jolla tiemestareiden toimintaa arvostellaan heidän itsensä arvioimien kuntoarvojen keskiarvoilla.

Tulosten perusteella ei mitatun epätasaisuusluvun ja tien arvioidun kunnon korrelaatio ole käytetyssä aineistossa niin hyvä kuin aiemmissa tutkimuksissa on esitetty.

Epätasaisuusluku on yleisessä käytössä kaikkialla maailmassa ja sen mittauserusteet melko vakiintuneet. Näin ollen epätasaisuusluku on vertailukelpoinen tien pinnan kunnon kuvaajista.

Epätasaisuusluvun luokitusta (viisiluokkainen luokitus) olisi syytä tarkentaa varsinkin, jos tasaisuusmittareita otetaan laajempaan käyttöön.

Viidennessä luvussa estimoitujen epätasaisuuslukuun perustuvien regressiomallien selityssasteet jäivät yleensä melko pieniksi.

Metsäisyyttä ja vaurioita käytettiin malleissa jatkuvina muuttujina. Näiden muuttujien jakaumat huomioiden olisi ollut parempi käytäntö luokitella vauriotiedot kahteen (tai kenties kolmeen) luokkaan ja jättää metsäisyys huomiotta.

Tien epätasaisuuslukuun vaikuttaa huomattavasti sademäärä. Sateen vaikutus on enimmäkseen kuntoa parantava. Liikennemäärän vaikutus havaittiin pieneksi.

Tielle tehdyistä toimenpiteistä tutkittiin höyläyksen vaikutusta. Havaintojen mukaan höyläys suoritettiin usein niin hyvälle tielle ettei höyläämällä tien kuntoa voitu parantaa. Koepiirien välillä oli selvä ero: Oulun alueella höyläys suoritettiin selvästi tasaisemmille teille kuin Hämeessä. Tutkimuksen perusteella ei höyläystä kannata tehdä, jos tien epätasaisuus on alle 300 cm /km.

Kulutuserroksen kulumista ei aineistosta voitu todeta.

Kuudennessa luvussa laskettiin koeteillä suoritettuihin kunnan arviointeihin ja toimenpideseurantaan perustuen lineaariseksi ohjelmaksi muotoiltu hoitomalli.

Ratkaisu osoitti etteivät höyläyksen vaikutukset olleet niin selviä, jotta höyläystä voisi suositella kustannusten perusteella optimaalisena toimenpiteenä. Saatu vakiojakauma ei merkittävästi poikennut kesän 1989 tasaisuuden ja kiinteyden jakaumista.

Tarvittavia siirtotodennäköisyyksiä käytössä olleesta aineistosta laskettaessa jouduttiin tekemään yksinkertaistavia oletuksia.

Kunnostusmalliin otettavan kulutuserroksen paksuuden luokittelu senttimetri-rajoin on kyseenalaista. Syynä tähän ovat mittaustarkkuus ja tielle suoritettavien toimenpiteiden luonne. Materiaalin määrä ja laatu ovat kuitenkin tärkeitä tietoja, jotta lisäystarve voidaan optimoida (minimoida investoinnit kerrokseen).

7.2 Suositukset tulevast

Jotta sorateiden ylläpidon optimointi voitaisiin suorittaa, tulisi varsinkin kunnostustoimenpiteiden vaikutuksia ja tarvetta tutkia tarkemmin. Intuitiivisesti ajatellen erilaiset tiet tarvitsevat eri määrät hoitoa ja kunnostusta. Intuition tueksi

tarvittaisiin kuitenkin todellista tietoa tekijöistä, jotka vaikuttavat ylläpitotarpeeseen ja tehdyn työn tulokseen. Oiva tapa tarvittavan tiedon keräämiseksi olisi järjestää kustannusten ja työmäärien seuranta tie- tai tieosakohtaiseksi. Nykyisellä kirjauskäytännöllä tarkka seuranta koko soratieverkolta on ylivoimainen tehtävä. Jo H. Piippo esitti työssään (1985) suppeaa tiekohtaista kustannus- ja työmääräseurantaa. Ehdotus seurannan järjestämiseksi on syytä toistaa. Seurantakohteet tulisi valita huolellisesti kokeensuunnittelun periaatteet huomioiden. Valinnassa olisi huomioitava liikennemäärän lisäksi myös tien routavauriot, kulutuskerroksen paksuus, kerrosmateriaalin ja pohjamaan laatu, kuivatuksen kunto sekä metsäisyys.

Nykykäytäntöä tarkempaa toimenpiteiden vaikutuksen seurantaa puoltaa myös Tielaitoksen siirtyminen tulospalkkaukseen vuonna 1990. Tulospalkkaus vaatii toimiakseen mittareita työn tuloksellisuudesta ja tehokkuudesta.

Kevätkunnostuksen ajoituksella ja suorituksella on suuri vaikutus soratien koko kesäkauden käyttäytymiseen. Onnistuneitten kevättöiden jälkeen tie pysyy kiinteänä pitkään. Jos kerrosta ei saada keväällä kiinteäksi, niin kiinteyttä ei voi saada aikaan kuin suurin kustannuksin. Vaihtoehtojen puute johtaa kiinteyden merkityksen vähättelyyn. Jotta saataisiin pois ajattelu, jonka mukaan kevätkunnostus onnistuu tai ei onnistu eikä sille voi mitään kohtuullisin kustannuksin, olisi tarkkaan tutkittava onnistumisen varmistavia tekijöitä.

Jatkossa tehtäväksi jää rakenneindeksin tarkka muodostaminen ja testaaminen. Samoin lisäselvityksiä vaatii tiegeometrian sekä kulutuskerroksen kunnon vaikutus ajonopeuksiin ja ajokustannuksiin.

HIPS-ohjelmiston käytöllä myös soratiestön optimoinnissa ja saatujen tulosten vertaamisella HDM-III-ohjelmiston antamiin tuloksiin lienee myös kansainvälistä mielenkiintoa.

Sorateiden ylläpito tarvitsee asiantuntemusta. Parhaiden asiantuntijoiden asiantuntemuksen jakaminen kaikkien tiemestareiden kesken olisi koko Tielaitoksen etujen mukaista. Teollisuuden monimutkaisten, vaikeasti mallinnettavien ja mitattavien prosessien sumeaan logiikkaan perustuvasta säädöstä on saatu Suomessakin hyviä kokemuksia. Sumeaan logiikkaan perustuva asiantuntijajärjestelmä saattaisi soveltua myös sorateiden ylläpidon asiantuntemuksen siirtoon.

Lähdeluettelo

- Alfelor, R. M. & McNeil, S. (1989). A Method for Determining the Optimal Blanding Frequency of Unpaved Roads. A Paper prepared for presentation at the 68th Annual Conference of the Transportation Research Board in January, 1989 at Washington, D.C. 29 s.
- Bartholomew, D. J. (1982). *Stochastic Models for Social Processes*. 3rd ed. New York, Wiley & Sons. 365 s.
- Carnahan, J. V., Davis, W. J., Shahin, M. Y., Keane, P. L., Wu, M. I. (1987). Optimal Maintenance Decisions for Pavement Management. *Journal on Transportation Engineering* **113**, no. 5.
- Çinlar, E. (1975). *Introduction to Stochastic Processes*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 402 s.
- Cooper, R. B. (1977). *Introduction to Queing Theory*. 2 New York. North Holland. 347 s.
- CSI (Cambridge Systematics, Inc.) (1989). *Highway Investment Programming System: User's Manual*. Cambridge, MA, 93 s.
- Eaton, R. A. (1988). *Development of the Unsurfaced Roads Rating Methodology*. Hanover, NH, US Army Corps of Engineers, Special Report 88-5. 13 s.
- Gendreau, M. & Duclos, L.-P. (1989). *A Decision-support System Approach for Pavement Management Planning*. Paper presented at the 5th World Conference on Transportation Research, Yokohama, Japan, July 10-14, 1989. Montreal, Université de Montréal. Centre de recherche sur les transports. Publication #620 (CRT-620).

- GEIPOT (1982). *Research on the Interrelationships between Costs of Highway Construction, Maintenance and Utilization* (PICR). Final Report, 12 volumes. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), Ministry of Transport, Brasilia.
- Golabi, K. & Kulkarni, R. (1982). A Statewide Pavement Management System. *Interfaces* 12, Dec. 6 1982, 5-21.
- Heyman, D. P. & Sobel, M. J. (1984). *Stochastic Models in Operations Research vol. II: Stochastic Optimization*. McGraw-Hill, New York, 555 s.
- Hinderer, K. (1976). Estimates for Finite-Stage Dynamic Programs. *J. Math. Anal. Appl.* 55, 207-238.
- Howard, R. D. (1971a). *Dynamic Probabilistic Systems vol. II : Semi-Markov and Decision Processes*. New York, J. Wiley & Sons. 1106 s.
- Jewell, W. S. (1963a). Markov Renewal Programming. I: Formulation, Finite Return Models. *Operations Research* 11, no. 6, 938-948.
- (1963b). Markov Renewal Programming. II: Infinite Return Models, Example. *Operations Research* 11, no. 6, 949-971.
- Jóhannesson, Á., Johansson, A., Kankare, E. & Skarra, N. (1984). *Sorateiden parantaminen ja kunnossapito, FUG*. Yhteispujoismaisen tutkimuksen loppuraportti. Espoo, VTT:n tutkimuksia 243. 95+3 s.
- Kerali, H. R. (1989). The World Bank's HDM3 Model. An unpublished paper delivered during HDM3 course 6.-10.3. 1989 at FRWA in Helsinki. University of Birmingham. 8 s.
- Lévy, P. (1954). Processus semi-Markoviens. *Proc.Int.Cong.Math.* 3, Amsterdam, 416-426.
- Mine, H. & Osaki, S. (1970). *Markovian Decision Processes*. New York, Elsevier. 137 s.
- Nesbitt, D. M. & Sparks, G. A. (1987). A Computationally Efficient System for Infrastructure Management with Application to Pavement Management. *Second North Amer.Conf.on Managing Pavements*. Toronto, Nov 2.-6. 1987. vol. 2, 2.219-2.237.

- OECD & World Bank (1990). *Road Monitoring for Maintenance Management: vol. 1 Manual for Developing Countries & vol. 2 Damage Catalogue for Developing Countries*. Road Transport Research. Report prepared by an OECD scientific expert group in co-operation with the World Bank. Paris. 113 + 91 s.
- Paredes, M., Fernando, E. & Scullion, T. (1990), Pavement Management Applications if GIS: A Case Study. A paper presented at the 69th annual Transportation Research Board meeting, Washington, D.C., Jan 1990. Collage Station, Texas. Texas Transportation Institute. 27 s.
- Paterson, W. D. O. (1987). *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*. The Highway Design and Maintenance Series. Published for the World Bank, Baltimore, The Johns Hopkins University Press. 454 s.
- , Fossberg, P. E., & Watanada, T. (1989) *World Bank's High Way Design Standandrs Model (HDM-III): A Synthesis of Road Deterioration & User Cost Relationships*. Paper presented at the 5th World Conference on Transportation Research, Yokohama, Japan, July 10-14, 1989. The World Bank, Washington, DC, 20433 USA. 16 s.
- Piippo, H. (1985). *Soratien kulutuserroksen kunnossapidosta ja uusimistarpeen arvioimisesta TVL:n Lapin piirissä*. Diplomityö. Oulu, Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. 116 s.
- Porteus, E. L. (1980). Improved Iterative Computation of the Expected Discounted Return in Markov and Semi-Markov Chains. *Z. Oper. Res.* **24**, 155-170.
- Pyke, R. (1961a). Markov Renewal Processes: Definitions and Preliminary Properties. *Ann. Math. Stat.* **32**, 1231-1242.
- (1961b). Markov Renewal Processes with Finitely many States. *Ann. Math. Stat.* **32**, 1243-1259.
- Shiffrin, R. & Thompson, M. (1986). Computational Methods for Semi-Markov Models. In *Modelling of Biomedical Systems*, Ed:s Eisenfield, J. & Witten, M. Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland) © IMACS, 1986. 161-166.

- Smith, W. L. (1955). Regenerative Stochastic Processes. *Proc.Roy.Soc. Ser.A.* 232, 6-31.
- Tákacs, L. (1954). Some Investigations Concerning Recurrent Stochastic Processes of a Certain Type. *Magyar Tud.Akad.Mat. Kutato Int.Közl.* 3, 115-128.
- Tapio, R. (1986). *Pavement management systems*. Julkaisematon matkakertomus opintomatkaista U.S.A:han 3.-10.5. 1986. Helsinki. 50 s.
- Trivedi, V., Moscovice, I., Bass, R. & Brooks, J. (1987). A Semi-Markov Model for Primary Health Care Manpower Supply Prediction. *Management Science* 33, no. 2, 149-160.
- Tsunokava, K. (1989). *Trend Curve Optimal Control Model for Highway Pavement Maintenance: An Extension for Global Optimization*. Paper presented at the 5th World Conference on Transportation Research, Yokohama, Japan, July 10-14, 1989. The Overseas Economic Cooperation Fund, Takebashi Godo Building, 4-1, Ohtemachi 1-Crome, Chiyoda-Ku, Tokio 100, Japan.
- Tie- ja vesirakennushallitus (1979). Tienrakennustyöt, Yleinen työselitys, Sitomattomat Päällysrakennekerrokset 1600. Helsinki. TVH 732460. 5 s.
- (1981). *Ajoanalysoittoritutkimuksia 1/81*. TVH-Taloussosaston Tutkimustoimisto. B7/1981. Helsinki. 40 s.
- (1982). *Oja- ja luiskamateriaalien käyttö soratien kulutuskerroksessa*. TVH-Kunnossapitotoimisto. THV 743815. Helsinki. 12+2 s.
- (1985a). *Sorateiden kunnossapito*. Helsinki, TVH-Kunnossapitotoimisto, THV 743939. 18 s.
- (1985b). *Tien kuivatusjärjestelmän kunnon arviointi*. Kuvastandardi. Helsinki, TVH-Kunnossapitotoimisto, THV 743925. 19 s.
- & Viatek Oy (1985c). *Päällysteen kuntotason vaikutus tienkäyttäjän ja tienpitäjän kustannuksiin - soratiet*. Kunnospidon laatutasotutkimus. Helsinki, TVH-Kunnossapitotoimisto, THV 743937. 22+3 s.

- (1986). *Sorateiden kulutuserroksen kuntoluokitus*. Kuvastandardi. Helsinki, TVH-Kunnossapitotoimisto, THV 743921. 10 s.
- (1988). *Yleisten teitten kunnossapitotilasto 1987*. Helsinki, TVH-Kunnossapitotoimisto ja tutkimustoimisto, THV 712895. 111 s.
- Watanatada, T., Dhareshwar, A. M. & Rezende Lima, P. R. S. (1987). *Vechile Speeds and Operating Costs: Models for Road Planning and Management*. The Highway Design and Maintenance Series. Publised for the World Bank, Baltimore, The Johns Hopkins University Press. 460 s.
- Wessels, J. & van Nunen, J. A. E. E. (1975). Discounted Semi-Markov Decision Process: Linear Programming and Policy Iteration. *Statistica Neerlandica* 29, 1-7.
- Viatek Oy, TVH/Tuotanto-os & VTT/Tie- ja liikenne laboratorio (1988). *Sorateiden kunnossapidon ohjausjärjestelmä*. väliraportti 30.9.1988. Helsinki. 38 s.

Liitteet

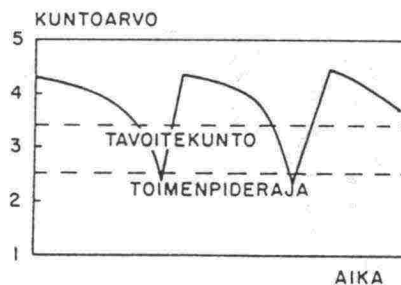
Liite A: Sorateiden kulutuskerroksen kuntoluokitus

Tie- ja vesirakennushallitus (1986). Helsinki, TVH-Kunnossapitotoimisto, THV 743921.

Käyttöohje:

1. Tien kunnan arviointi suoritetaan kilometrin pituisin jaksoin.
2. Kullekin jaksolle annetaan kokonaisluokitusarvosana 1–5.
3. Tien keskim. kunto saadaan laskemalla havaintoarvojen keskiarvo.
4. Yksittäiset havaintoarvot kirjataan kilometreittäin toimenpidesuunnittelua varten.

SORATEIDEN KULUTUSKERROKSEN KUNTOLUOKITUS



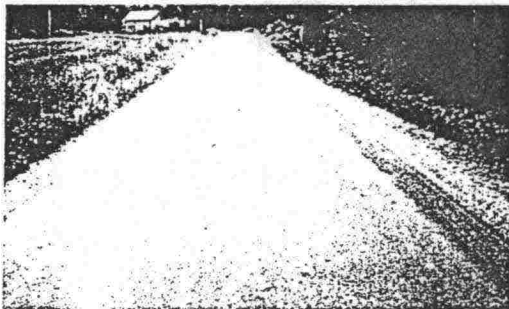
ISBN 951-46-7343-3

TVH 743921

Helsinki 1986. Valtion painatuskeskus

02.10.1990

KUNTOARVO 5



KUNTOARVO 5

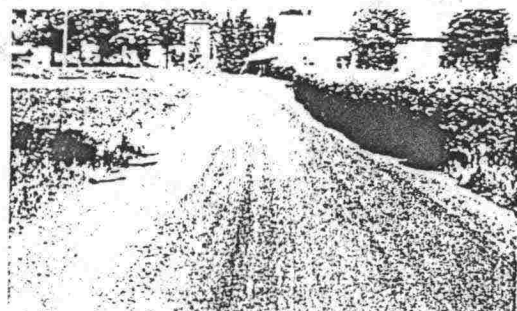
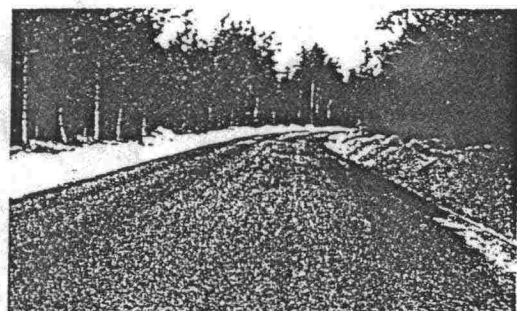


Tien pinta on säilyttänyt muotonsa ja on hyvin tasainen ja kiinteä. Pinnan mahdollinen epätasaisuus ei vaikuta ajomukavuuteen.
— epätasaisuusluku ≤ 280 cm/km

KUNTOARVO 4



KUNTOARVO 4



Tien pinta on yleensä säilyttänyt muotonsa ja on tasainen ja kiinteä. Muutamia pieniä erillisiä kuoppia voi siellä täällä esiintyä. Pölyämistä ei tiellä ole havaittavissa. Pinnan epätasaisuuden vuoksi ei ajonopeutta tarvitse hiljentää.

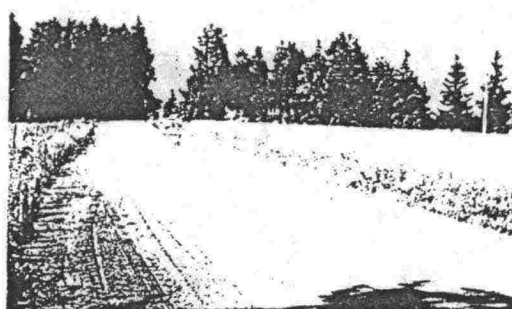
— epätasaisuusluku 281–320 cm/km

KUNTOARVO 3



Tien pinta on yleensä säilyttänyt muotonsa ja on suurimmaksi osaksi tasainen ja kiinteä. Pienehköjä kuoppia ja muuta epätasaisuutta voi olla paikoitellen. Tie pölyää jonkin verran. Tiellä olevat kuopat ja muut epätasaisuudet voidaan väistää tai ne ovat sellaisia, ettei ajonopeutta tarvitse niiden vuoksi hilljittää.

KUNTOARVO 3



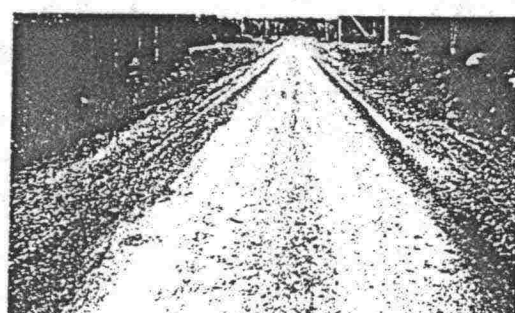
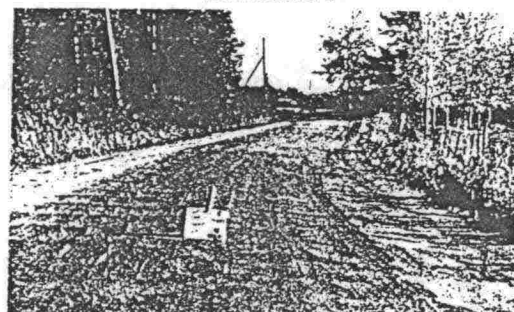
Ohittavaa tai vastaantulevaa ajoneuvoa väistettäessä sekä vastaavissa olosuhteissa saattaa ajonopeuden hilljentyminen tulla kyseeseen.
— epätasaisuusluku 321—360 cm/km

KUNTOARVO 2



Tien poikkileikkausmuoto on jonkin verran voinut muuttua. Tien pinnassa on jonkin verran "Pyykkilautaa". Paikoin voi olla varoitusmerkein osoitettavia painumia tai kohoutumia. Tie pölyää kohtalaisesti. Ajonopeutta on joskus hilljennettävä ja epätasaisia kohtia varottava.

KUNTOARVO 2



— epätasaisuusluku 361—400 cm/km

KUNTOARVO 1



KUNTOARVO 1



Tien poikkileikkausmuoto on useista kohdista muuttunut. Pinta on epätasainen kuoppien, "Pyykkilaudan" ja purkautumien vuoksi. Tiellä on painumia ja kohoumia, joita ei voida väistää. Tie pölyää runsaasti. Tien pintaa on jatkuvasti tarkkailtava ja ajonopeutta useasti vaihdettava.

— epätasaisuusluku > 400 cm/km

Liite B: Semimarkovin prosessit

B.1 Semi-Markovin prosessi ja semimarkovilainen päätöksentekoprosessi

Semi-Markovin prosessin (SMP) esittelivät samaan aikaan toisistaan riippumatta Lévy (1954), Smith (1955) ja Tákacs (1955). Myöhemmin perustavaa laatua olevaa työtä SMP:n teorian kehittämisessä teki Pyke (1961a, 1961b). Optimoinnissa käytettävää semimarkovilaista päätöksentekoprosessia (semi-Markovian decision process, SMDP) ovat kehittäneet mm. Jewell (1963) ja Howard (1971).

B.2 Semi-Markovin prosessi

Olkoon todennäköisyys, jolla prosessi siirtyy tilasta i tilaan j p_{ij} . Näiden siirtotodennäköisyyksien oletetaan olevan riippumattomia reitistä, jolla tilaan i on tultu. Määritetään vielä $h_{ij}(t)$, joka on todennäköisyys, jolla prosessi on tilassa i ajan t ehdolla, että seuraava tila on j . Tilat i ja j kuuluvat (tässä työssä) diskreettiin, äärelliseen tilajoukkoon $E = \{1..N\}$. Siirtojen välisten aikojen oletetaan olevan toisistaan riippumattomia ja positiivisia.

Määritellään semi-Markovin ydin SMK:n (semi-Markov kernel)

$$q_{ij}(t) = p_{ij} \cdot h_{ij}(t) . \quad (B.1)$$

Matriisimuodossa kirjoitamme

$$Q(t) = P \square H(t) , \quad (B.2)$$

jossa $P = \{p_{ij}, i, j \in E\}$, $H(t) = \{h_{ij}(t), i, j \in E, t \geq 0\}$, $q_{ij}(t) = p_{ij} h_{ij}(t)$. Merkki \square tarkoittaa siis matriisien kongruenttia tuloa¹. Semi-Markovin prosessi on

¹ Jos $C = A \square B$, niin $C = \{c_{ij}\}$, jossa $c_{ij} = a_{ij} b_{ij}$. Nimitys kongruentti tulo on Howardin (1971); Shiffrin (1986) kutsuu tätä matriisien A ja B Hadamard-tuloksi.

täydellisesti määritelty, kun tunnetaan siirtotodennäköisyydet p_{ij} ja pysymisaikajakaumat $h_{ij}(t)$ sekä tilojen alkujakauma.

Merkitään odotusarvo ehdolliselle tilassa i pysymisajalle

$$\bar{\tau}_{ij} = E\{h_{ij}(t)\} = \int_0^\infty h_{ij}(t) t dt \quad (B.3)$$

ja odotusajan $w_i(t) = \sum_j p_{ij} h_{ij}(t)$ odotusarvo $\bar{\tau}_i = E\{w_i(t)\}$

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_i &= \sum_j p_{ij} \bar{\tau}_{ij} = \sum_j p_{ij} \int_0^\infty h_{ij}(t) t dt \\ &= \int_0^\infty \sum_j p_{ij} h_{ij}(t) t dt. \end{aligned} \quad (B.4)$$

Olkoon $g_i(t)$ todennäköisyys, jolla odotusaika τ_i tilassa i on pidempi kuin t :

$$g_i(t) = P\{\tau > t \mid i\} = \int_t^\infty w_i(\tau) d\tau = 1 - \sum_j p_{ij} \int_0^t h_{ij}(\tau) \tau d\tau. \quad (B.5)$$

B.3 Intervallisiirtotodennäköisyys

Intervallisiirtotodennäköisyys $\phi_{ij}(t)$ on todennäköisyys, jolla hetkellä 0 tilaan i siirtynyt systeemi on hetkellä t tilassa j . Olennaista on, että systeemi saapuu tilaan i hetkellä 0. Homogeeninen² SMP, jolla on oletusten mukaan Markovin ominaisuus (seuraavaan siirtoon vaikuttaa ainoastaan tila, jossa ollaan), toteuttaa myös Chapman-Kolmogorovin yhtälön, joka voidaan SMP:lle kirjoittaa

$$\phi_{ij}(t) = \phi_{ir}(\tau) \phi_{rj}(t-\tau), \quad 0 < \tau \leq t. \quad (B.6)$$

Tässä tilasta i siirrytään tilaan j yhden välitilan kautta. Ottamalla huomioon, että mahdollisia välitiloja on N kappaletta ja siirtyminen voi tapahtua minä hetkenä tahansa välillä $(0, t)$, kirjoitetaan $\phi_{ij}(t)$ muotoon:

² $Q(t)$ sama kaikille t .

$$\begin{aligned}
\phi_{ij}(t) &= \delta_{ij} \sum_{j=0}^N p_{ij} \int_t^{\infty} h_{ij}(\tau) d\tau \\
&\quad + \sum_{j=0}^N p_{ir} \int_0^t h_{ir}(\tau) \phi_{rj}(t-\tau) d\tau \\
&= \delta_{ij} g_i(t) + \sum_{j=0}^M p_{ir} \int_0^t h_{ir}(\tau) \phi_{rj}(t-\tau) d\tau, \quad (B.7)
\end{aligned}$$

jossa $\delta_{ij} = 1$ jos $i=j$ ja $\delta_{ij} = 0$ jos $i \neq j$ (Kroneckerin delta). Summaus huomioi mahdolliset välitilat ja integrointi siirtymisajat. Termi $\delta_{ij} g_i(t)$ vastaa tilannetta, jossa systeemi pysyy tilassa i koko aikavälin $(0, t)$. Matriisimuodossa sama kirjoitetaan:

$$\Phi(t) = G(t) + \int_0^t Q(\tau) \Phi(t-\tau) d\tau. \quad (B.8)$$

Jatkuvaparametrisen prosessin siirtotodennäköisyyksien ratkaisemiseksi suoritetaan Laplace-muunnos, jolla konvoluutio muuntuu funktioiden Laplace-muunnosten kertomiseksi $L(f * g) = L(f) \cdot L(g)$. Merkitään $L(f(t)) = F^*(s)$.

$$\Phi^*(s) = G^*(s) + Q^*(s) \Phi^*(s). \quad (B.9)$$

Ratkaistaan tästä intervallisiirtotodennäköisyys $\Phi^*(s)$:

$$\Phi^*(s) = [I - Q^*(s)]^{-1} G^*(s). \quad (B.10)$$

Laplace-muunnoksen avulla tapahtuva ratkaisu on suuremmissa systeemeissä varsin työläs ellei peräti mahdoton tehtävä.

Yleisessä semi-Markovin prosessissa ensimmäiseen siirtoon liittyvät todennäköisyydet voivat olla muista siirroista poikkeavat. Tällainen tilanne on esimerkiksi kun systeemin edellisen siirron ajankohtaa ei tunneta.

B.4 Kustannukset semi-Markovin prosessissa

Semi-Markovin mallien käyttökelpoisuutta voidaan helposti lisätä liittämällä niihin kustannukset (tuotto on negatiivinen kustannus):

Kun systeemi on tilassa i ja seuraavaksi siirtymässä tilaan j , se generoi kustannuksen (mielivaltaisen) kustannusfunktion $R_{ij}(t | \tau(i,j))$ mukaan. $R_{ij}(t | \tau(i,j))$ riippuu tiloista i ja j sekä tilassa i pysymisajasta $\tau(i,j)$ ja ajasta t , joka on kulunut systeemin saapumisesta tilaan i . Soratiemallin kannalta mielenkiintoinen on erityisesti lineaarinen kustannusfunktio, jossa on kiinteä, siirron tapahtuessa maksettava kustannus b_{ij} (bonus) ja jatkuvasti kertyvä (lineaarinen) kustannus $y_{ij}t$ (yield):

$$R_{ij}(t | \tau(i,j)) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ y_{ij}t, & 0 < t < \tau(i,j) \\ b_{ij} + y_{ij}t, & t = \tau(i,j) \end{cases} \quad (B.11)$$

Hetkellä 0 tilaan i saapuneen systeemin, jonka kustannusfunktio on (B.11), hetkeen t mennessä generoiman kustannuksen nykyarvon odotusarvo $v_i(t, \alpha)$ on

$$\begin{aligned} v_i(t, \alpha) = & \sum_j p_{ij} \int_0^\infty h_{ij}(\tau) \left[\int_0^\tau e^{-\alpha\sigma} y_{ij}(\sigma, \alpha) d\sigma + e^{-\alpha\sigma} v_i(0) \right] d\tau \\ & + \sum_j p_{ij} \int_0^t h_{ij}(\tau) \left[\int_0^\tau e^{-\alpha\sigma} y_{ij}(\sigma, \alpha) d\sigma + \right. \\ & \left. e^{-\alpha\sigma} b_{ij}(\tau) + e^{-\alpha\sigma} v_j(t-\tau, \alpha) \right] d\tau. \end{aligned} \quad (B.12)$$

Ensimmäinen siirto tilasta i voi tapahtua joko ennen tai jälkeen hetken t . Ensimmäinen summalauseke vastaa tilannetta, jossa systeemi on koko ajan $(0, t)$ tilassa i ja toinen tilannetta, jossa ensimmäinen siirto i :stä pois tapahtuu ennen hetkeä t . $v_i(0)$ on jäännösarvo, jos systeemi on tilassa i hetkellä t ja α on diskonttaustekijä. Systeemin siirtyessä tilasta i seuraavaksi tilaan j , on tilassa i oloaikana generoidun kustannuksen odotusarvo lausuttavissa

$$r_{ij}(\alpha) = \int_0^\infty h_{ij}(\tau) \left[\int_0^\tau e^{-\alpha\sigma} y_{ij}(\sigma, \alpha) d\sigma + e^{-\alpha\sigma} b_{ij}(\tau) \right] d\tau. \quad (B.13)$$

Tilassa i käynnin kustannuksen odotusarvoksi $r_i(\alpha)$ saadaan tästä:

$$r_i(\alpha) = r_i = \sum_j p_{ij} \int_0^\infty h_{ij}(\tau) \left[\int_0^\tau e^{-\alpha\sigma} y_{ij}(\sigma, \alpha) d\sigma + e^{-\alpha\sigma} b_{ij}(\tau) \right] d\tau.$$

$$(B.14)$$

B.5 Päätöksentekoprosessi

Päätöksenteon perusongelma on miten valita kuhunkin tilaan tultaessa käypä toimenpide siten, että odotettavissa olevien kustannusten nykyarvo (tai kustannus ajanyksikköä kohti) olisi mahdollisimman pieni. Tähän optimointiongelmaan ei ole olemassa yleistä ratkaisua. Ratkaisumenetelmän valintaan vaikuttavat toisaalta käsiteltävä horisontti: siirtojen määrä n tai käytettävä aika t (ääretön/äärellinen), ja toisaalta diskonttaustekijän arvo α .

Taulukko B.1 Yhteenveto päätöksenteko malleista ja algoritmeista (Jewell, 1963).

Horisontti	diskonttaustekijä $\alpha > 0$	$\alpha \rightarrow 0$
siirtojen määrä n äärellinen	rekursiivinen	ratkaisu
$n \rightarrow \infty$	policy-space	policy-space
$t \rightarrow \infty$	iteraatiot	iteraatiot *
äärellinen aika t	rekursiivinen ratkaisu	diskretoinnin jälkeen

* vain stationäärit päätösvaihtoehdot

Vaikka todellisuudessa kaikki käsiteltävät ajanjaksot ovat äärellisiä (ja ainakin oleellisen ajanjakson pituuden approksimaatio tiedossa (Hinderer, 1976, Wessels & al., 1975)) pyritään optimointiongelmaa ratkomaan käyttäen ääretöntä ajanjaksoa. Tämä tehdään toivoen, että näin saatu helpommin ratkaistava tehtävä olisi hyvä approksimaatio alkuperäiselle tehtävälle.

Äärellisen ajanjakson tapauksessa ratkaisua voidaan hakea kaavaa (B.12) soveltaen käymällä läpi kaikki (käyvät) päätösvaihtoehdot ja valitsemalla näistä optimaalinen. Tehtävään voidaan soveltaa myös dynaamista ohjelmointia. Dynaamisessa ohjelmoinnissa ratkaisuun pyritään rekursiivisesti (ajan) lopusta lähtien ja optimaalisuusperiaatetta noudattaen. (Kussakin tilassa optimaalinen päätös on riippumaton reitistä, jota kyseiseen tilaan on tultu.) Ennen dynaamisen ohjelmoinnin käyttöä on jatkuva aikaparametri diskretoitava. Dynaamisen ohjelmoinnin tehtävän ratkaisuun on kehitetty erilaisia approksimointi- ja iterointimenetelmiä.

Käsiteltäessä ääretöntä ajanjaksoa (t riittävän suuri) käytetään policy-space iteraatioita. Näillä iteraatioilla on kaksi perusvaihetta (Porteus, 1980) arvon määrittäminen (value determination) ja päätöksen parantaminen (policy improvement). Joissakin algoritmeissa käytetään myös normalisointiaskelta (normalization step). Perusalgoritmit ovat arvoiterointi (value iteration), jota

kutsutaan myös pre-Jacobi iteraatioksi sekä tämän variantit ja päätösiteeraatio (policy iteration). Päätösiteeraatio voidaan esittää lineaarisen ohjelmoinnin tehtävänä. Laskennan nopeuttamiseksi on näihin algoritmeihin esitetty monia muunnosmenetelmiä, joilla alkuperäinen tehtävä muunnetaan helpommin (nopeammin) laskettavaan muotoon.

B.6 Äärettömän ajan tehtävän formulointi lineaarisen ohjelmoinnin tehtävänä

Käsitellään täysin ergodista³ prosessia, jonka keskimääräinen kustannus aikayksikössä (kun $t \rightarrow \infty$) on $g = \sum_j \pi_j \tau_j r_j / \sum_j \pi_j \tau_j$ (Mine & al., 1970, Heyman & al., 1984, Wessels & al., 1975) Tässä π_j on tilassa j olon todennäköisyyden raja-arvo (ajasta riippumaton stationäärijakauma), τ_j tilassa j käynnin keston odotusarvo ja r_j tilassa j käynnin kustannusten odotusarvo. Päätöksen teossa minimoitava kohdefunktio on nyt

$$g = \sum_j \pi_j(f) \tau_j^k r_j^k / \sum_j \pi_j(f) \tau_j^k, \quad (\text{B.15})$$

jossa $\pi_j(f)$ on stationääristä strategiaa f^∞ vastaava rajajakauma ja τ_j^k sekä r_j^k vastaavat tilassa j käynnin keston ja kustannusten odotusarvot. Ergodisen prosessin rajajakaumat toteuttavat yhtälöt

$$\pi_j(f) = \sum_i \pi_i(f) p_{ij}(f),$$

$$\sum_j \pi_j(f) = 1 \quad \text{ja}$$

$$\pi_j(f) > 0. \quad (\text{B.16})$$

Olkoon nyt d_j^k yhdistetty todennäköisyys, jolla prosessi on tilassa j ja tehdään päätös k . Tällöin pätee $\sum_j d_j^k = 1$ ja $0 \leq d_j^k (\leq 1)$. Käyttäen d_j^k :ta kirjoitetaan kohdefunktio nyt

³ Ergodinen prosessi on prosessi, jolla on vain yksi ekvivalenttiluokka l . odotusarvo tilasta i tilaan j siirtymisajalle on $< \infty$ kaikille i ja j

$$\sum_j \sum_k \pi_j(f) \tau_j^k r_j^k d_j^k / \sum_j \sum_k \pi_j(f) \tau_j^k d_j^k.$$

$\pi_j(f)$:tä koskevat ehdot saavat nyt muodon

$$\pi_j(f) - \sum_i \pi_i(f) p_{ij}^k d_j^k = 0,$$

$$\sum_j \pi_j(f) = 1 \quad \text{ja}$$

$$\pi_j(f) > 0. \quad (\text{B.17})$$

Asettamalla

$$x_j^k = \pi_j(f) d_j^k \geq 0 \quad (\text{B.18})$$

ja käyttäen hyväksi tietoa $\pi_j(f) = \sum_k x_j^k$ voimme kirjoittaa seuraavan lineaarisen ohjelmoinnin tehtävän

$$\min \sum_j \sum_k \tau_j^k r_j^k x_j^k / \sum_j \sum_k \tau_j^k x_j^k$$

ehdoilla

$$\sum_k x_j^k - \sum_i \sum_k p_{ij}^k x_j^k = 0,$$

$$\sum_j \sum_k x_j^k = 1 \quad \text{ja}$$

$$x_j^k \geq 0. \quad (\text{B.19})$$

Tämä tehtävä voidaan muuntaa ottamalla edelleen käyttöön uudet muuttujat y_j^k ja y , jotka määritellään

$$y_j^k = x_j^k / \sum_j \sum_k \tau_j^k x_j^k$$

ja
$$y = 1 / \sum_j \sum_k \tau_j^k x_j^k \quad (B.20)$$

Havaitaan myös, että $y = \sum_j \sum_k y_j^k$. Optimaalinen strategia ei riipu y :stä ja niinpä lineaarinen ohjelma on kirjoitettavissa:

$$\min \sum_j \sum_k \tau_j^k r_j^k y_j^k$$

ehdoilla

$$\sum_k y_j^k - \sum_i \sum_k p_{ij}^k y_j^k = 0,$$

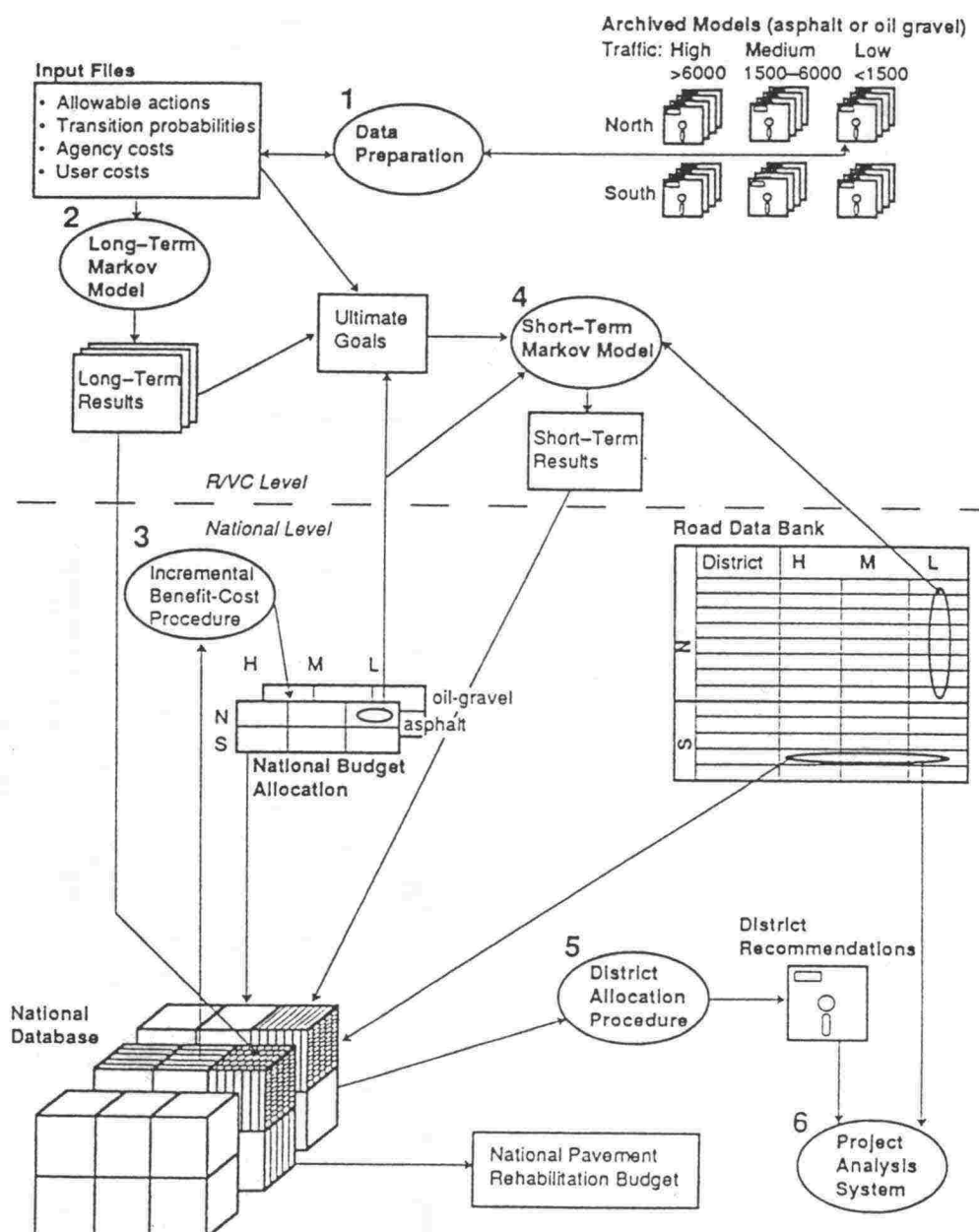
$$\sum_j \sum_k \tau_j^k y_j^k = 1 \quad \text{ja}$$

$$y_j^k \geq 0. \quad (B.21)$$

Lineaarisen ohjelmoinnin tehtävän ratkaisuna saadaan optimiratkaisulle arvot y_j^k . Näistä voidaan laskea $y = \sum_j \sum_k y_j^k$ ja edelleen $x_j^k = y_j^k / y$, $x_j^k = \pi_j(f) d_j^k$ sekä $\pi_j(f) = \sum_k x_j^k = \sum_k (y_j^k / y)$, joka on tilajakauma optimipolitiikkaa noudattaen. Kustannukset ajan yksikköä kohden saadaan kertomalla tilajakauma tilaan liittyvän optimaalisen toimenpiteen kustannuksilla.

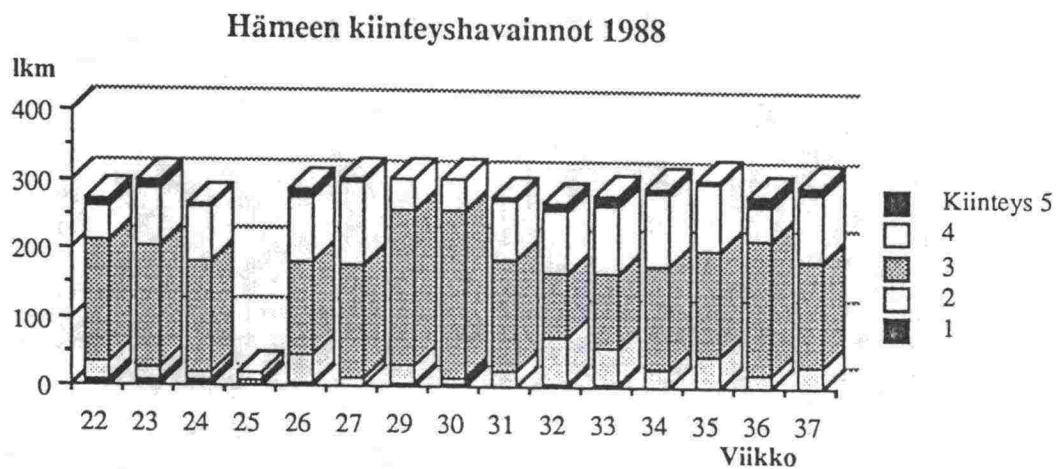
Liite C: HIPS-toimintakaavio

CSI (Cambridge Systematics, Inc.) (1989). *Highway Investment Programming System: User's Manual*. Cambridge, MA.

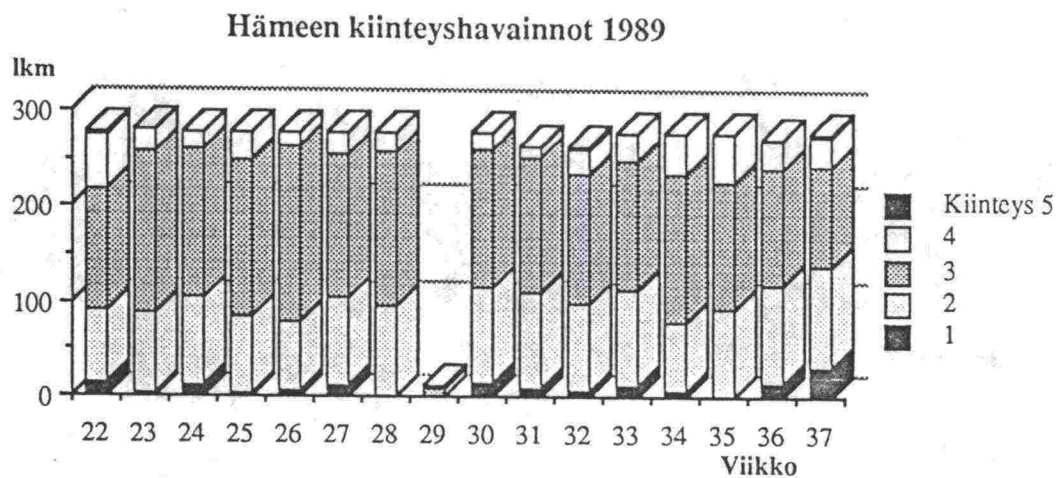


Liite D: Viikottaiset kuntoarviot

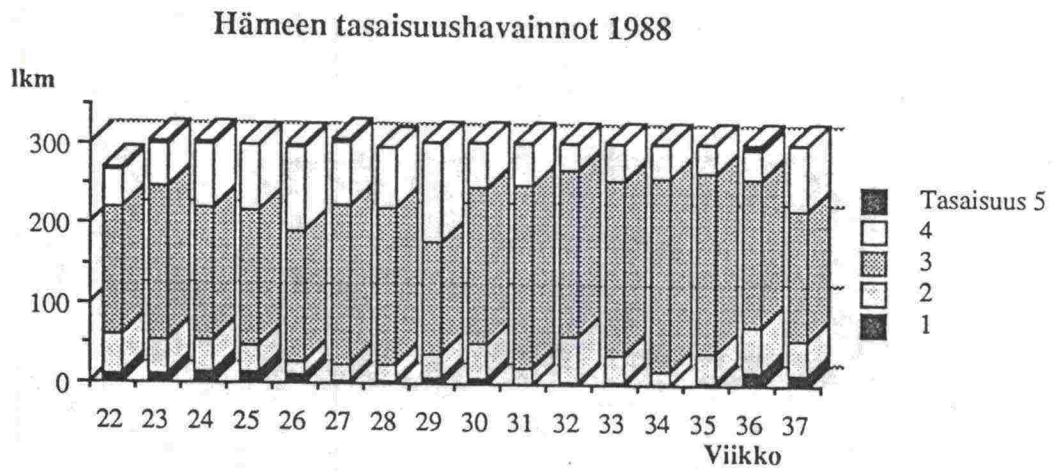
Tässä liitteessä ovat pylväsdiagrammeina viikottaisten kuntoarvioiden jakaumat.



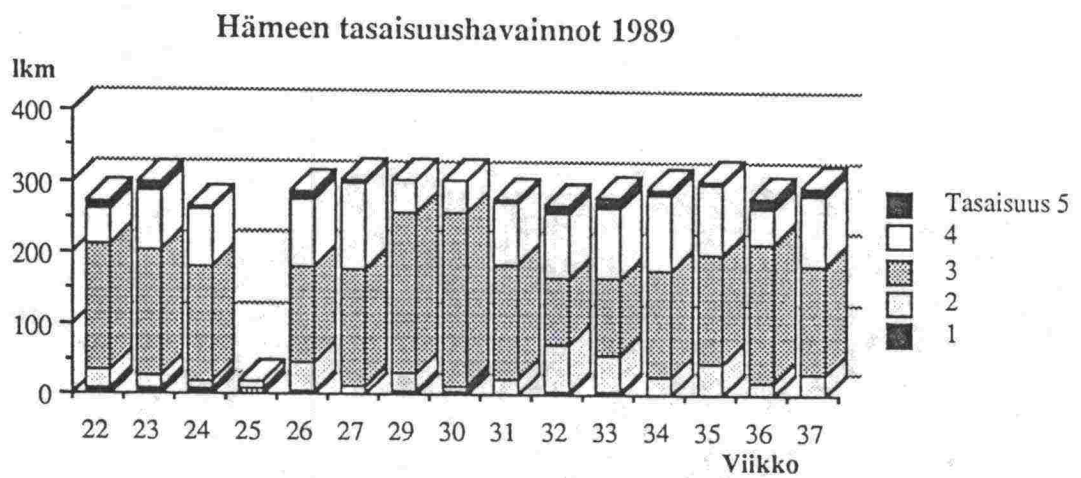
Kuva D.1. Hämeen kiinteysarviot 1988.



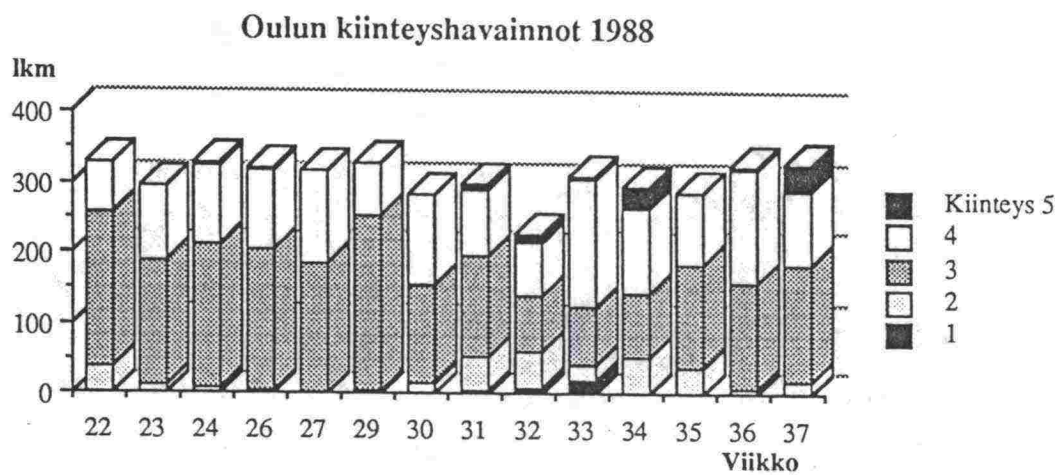
Kuva D.2. Hämeen kiinteysarviot 1989.



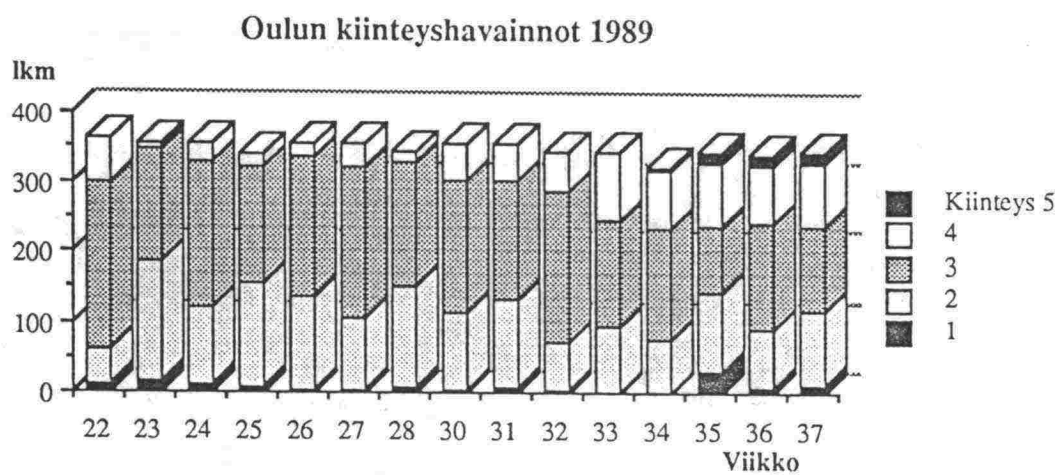
Kuva D.3. Hämeen tasaisuusarviot 1988.



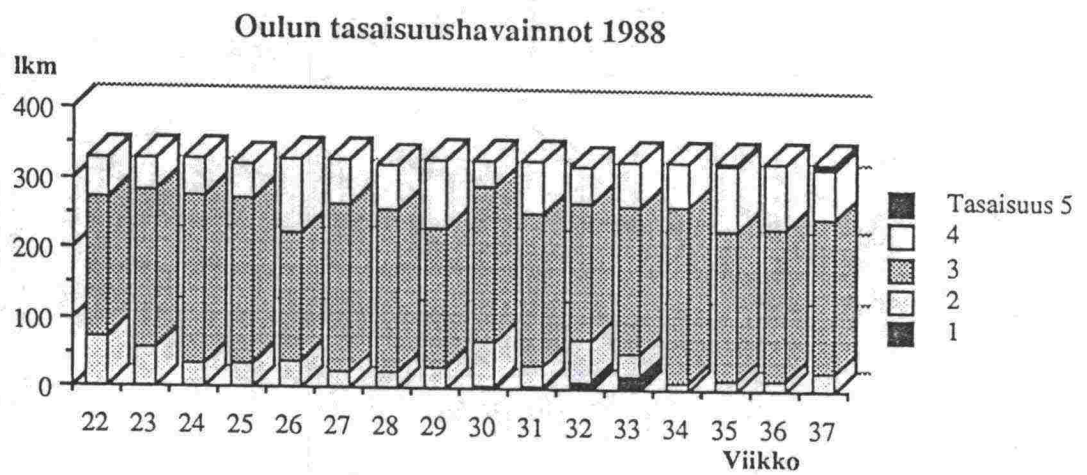
Kuva D.4. Hämeen tasaisuusarviot 1989.



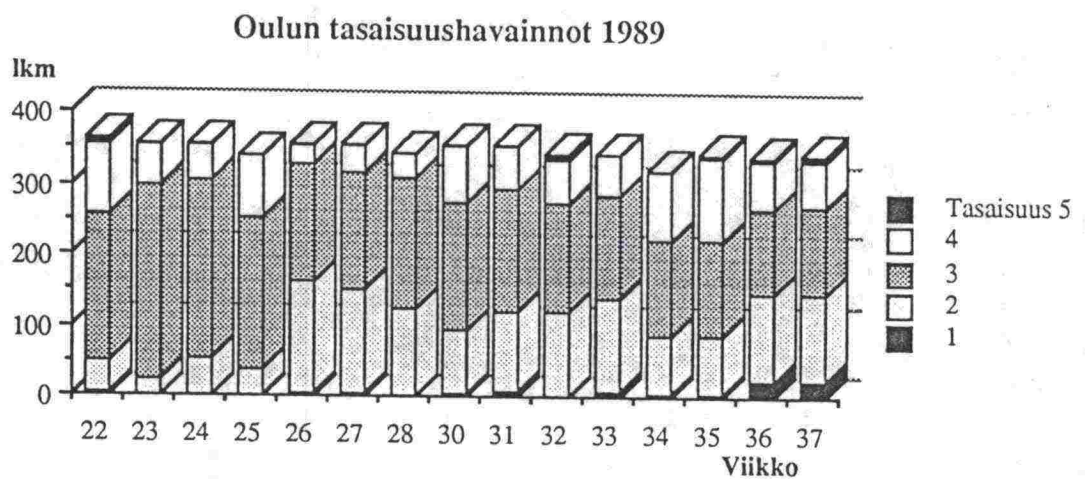
Kuva D.5. Oulun kiinteysarviot 1988.



Kuva D.6. Oulun kiinteysarviot 1989.

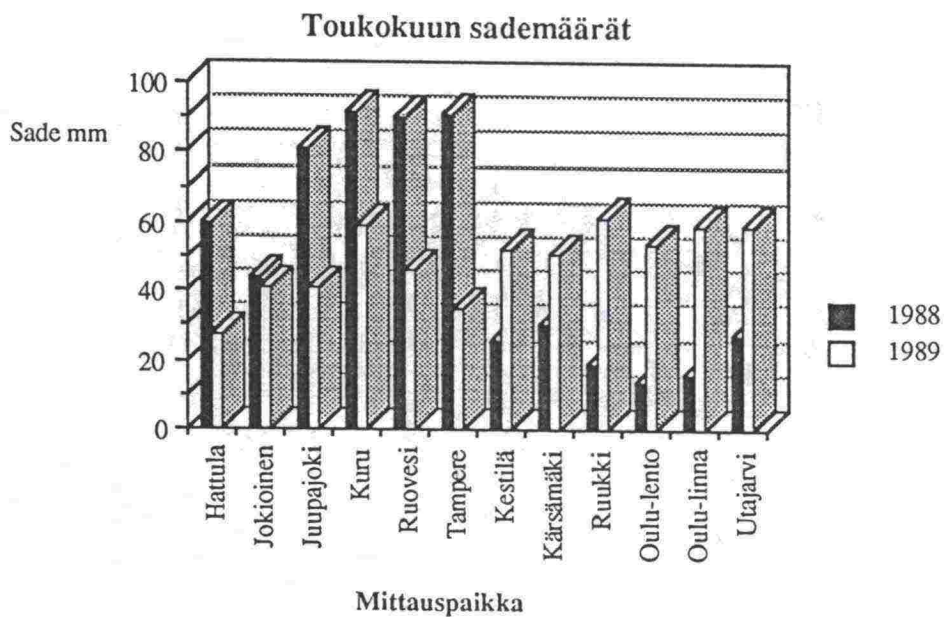


Kuva D.7. Oulun tasaisuusarviot 1988.

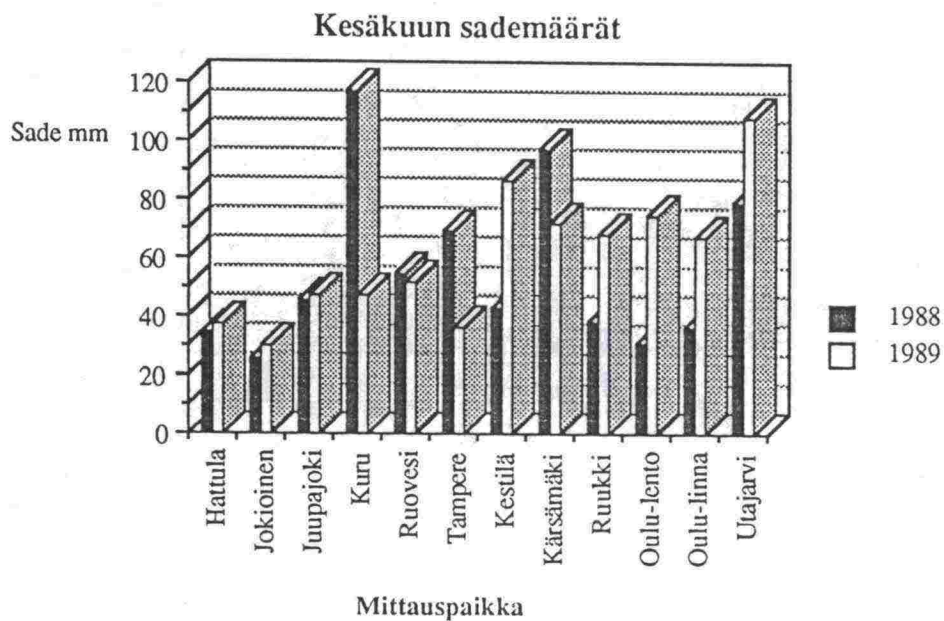


Kuva D.8. Oulun tasaisuusarviot 1989.

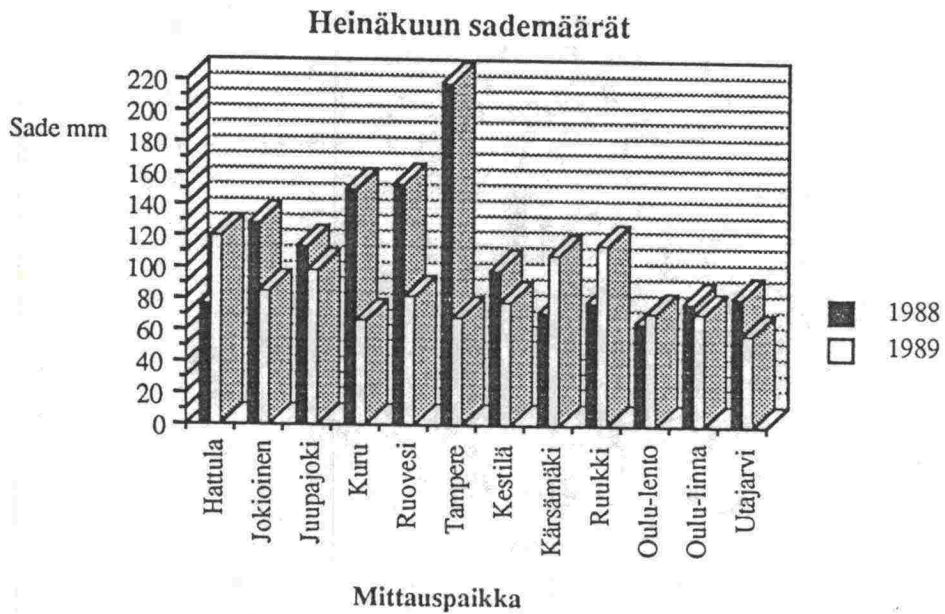
Liite E: Sateet vuosina 1988 ja 1989



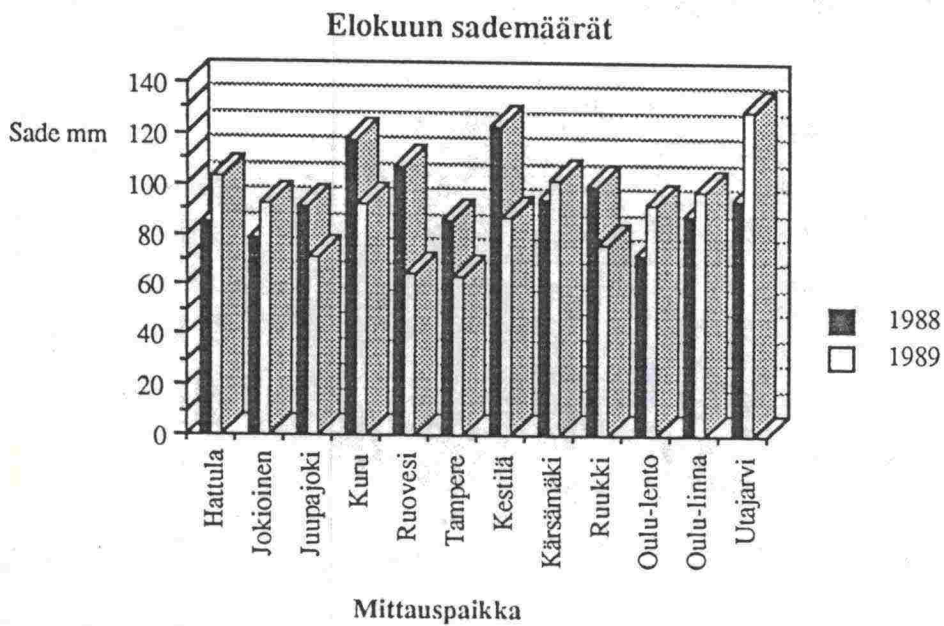
Kuva E.1 Toukokuun keskimääräiset sateet [mm/kk].



Kuva E.2 Kesäkuun keskimääräiset sateet [mm/kk].



Kuva E.3 Heinäkuun keskimääräiset sateet [mm/kk].



Kuva E.4 Elokuun keskimääräiset sateet [mm/kk].

Liite F: Tiemestareiden kunnonarviointi

Arviot tiemestaripiireittäin (VTT:n arvion mukaan luokiteltuna)

Tiemestareiden kuntoarviot on seuraavissa luokiteltu VTT:n kullekin osuudelle antaman arvion perusteella ja tämän on laskettu luokittaiset keskiarvot.

Kuntoarvo = min {tasaisuus, kiinteys, pölyävyys}

Rivi	TMP	VTT	keskiarvo	varianssi	havaintoja
6	412	1	3.11111	0.17949	27
7	412	2	3.17105	0.33035	76
8	412	3	3.34146	0.33049	41
10	415	1	0.00000	.	1
11	415	2	2.95455	2.23593	22
12	415	3	3.27273	1.41818	11
13	415	4	3.00000	0.00000	2
15	416	1	3.03704	0.34473	27
16	416	2	3.33702	0.49134	181
17	416	3	3.78723	0.47549	47
18	421	1	2.05556	0.17320	18
19	421	2	3.28169	0.29095	71
20	421	3	3.40000	0.40000	15
21	422	1	3.08333	0.08333	12
22	422	2	3.43860	0.25063	57
23	422	3	3.88136	0.10637	59
24	422	4	4.00000	.	1
25	423	1	3.33333	0.33333	3
26	423	2	3.85714	0.13187	14
27	423	3	3.00000	.	1

29	424	1	3.00000	.	1
30	424	2	3.35000	0.34474	20
31	424	3	3.40000	0.25714	15
33	436	1	2.66667	0.23188	24
34	436	2	3.15504	0.19453	132
35	436	3	3.38889	0.25163	18
39	1201	2	3.32174	0.44821	125
40	1201	3	3.37778	0.24040	45
41	1202	1	0.00000	0.00000	6
42	1202	2	1.05512	2.44932	127
43	1202	3	1.17073	3.09512	41
46	1203	2	2.99248	0.18934	133
47	1203	3	3.00000	0.20408	50
51	1204	2	3.00000	0.00000	231
52	1204	3	4.00000	.	143
55	1205	1	2.00000	.	1
56	1205	2	2.71212	0.20816	68
57	1205	3	2.78378	0.28529	39
58	1205	4	3.00000	0.00000	3
60	1224	1	2.00000	0.00000	3
61	1224	2	2.00000	0.00000	6
62	1224	3	2.57143	0.26374	14
63	1224	4	3.00000	.	1

Kuntokeskiarvo = (tasaisuus + kiinteys + pölyvyys) / 3

Rivi	TMP	VTT	keskiarvo	varianssi	havaintoja
7	412	1.66667	3.75000	0.10185	4
8	412	2.00000	3.29167	0.13148	16
9	412	2.33333	3.50000	0.22031	30
10	412	2.66667	3.75194	0.20155	43
11	412	3.00000	3.90123	0.17790	27
12	412	3.33333	4.04545	0.04545	22
13	412	3.66667	4.33333	0.00000	2
15	415	2.00000	2.16667	9.38889	2
16	415	2.33333	4.22222	0.03704	3
17	415	2.66667	2.29630	4.76235	9
18	415	3.00000	3.55556	1.86111	9
19	415	3.33333	4.04167	0.14087	8
20	415	4.00000	4.33333	0.07407	4
21	415	4.33333	4.00000	.	1
23	416	1.33333	4.00000	.	1
24	416	1.66667	3.51852	0.03086	9
25	416	2.00000	3.75439	0.30669	19
26	416	2.33333	3.75587	0.22209	71
27	416	2.66667	3.91057	0.25802	82
28	416	3.00000	4.00694	0.18671	48
29	416	3.33333	4.27083	0.31435	16
30	416	3.66667	4.14815	0.22531	9
31	421	1.66667	2.77778	0.48148	3
32	421	2.00000	3.36667	0.26784	20
33	421	2.33333	3.90741	0.15432	18
34	421	2.66667	3.82609	0.12217	46
35	421	3.00000	3.84314	0.08497	17
36	422	1.66667	4.66667	.	1
37	422	2.00000	4.00000	0.00000	3
38	422	2.33333	3.89474	0.07472	19
39	422	2.66667	3.70370	0.12927	18
40	422	3.00000	4.01550	0.04737	43
41	422	3.33333	4.20588	0.07417	34

42	422	3.66667	4.29630	0.09568	9
43	422	4.00000	4.66667	.	1
45	423	2.33333	4.38889	0.10741	6
46	423	2.66667	4.42857	0.06349	7
47	423	3.00000	4.13333	0.08889	5
49	424	2.00000	3.00000	.	1
50	424	2.33333	3.54167	0.44246	8
51	424	2.66667	3.26667	0.16790	10
52	424	3.00000	3.48718	0.25214	13
53	424	3.33333	3.33333	0.33333	3
54	424	3.66667	3.33333	.	1
56	436	1.33333	3.08333	0.10185	4
57	436	1.66667	3.00000	0.05556	5
58	436	2.00000	3.06061	0.06263	11
59	436	2.33333	3.42636	0.11283	44
60	436	2.66667	3.36150	0.15475	73
61	436	3.00000	3.65625	0.11817	32
62	436	3.33333	3.75000	0.32407	4
66	1201	1.00000	3.00000	.	1
67	1201	1.33333	3.47619	0.06878	14
68	1201	1.66667	3.37576	0.11134	60
69	1201	2.00000	3.49333	0.12148	29
70	1201	2.33333	3.46914	0.14752	30
71	1201	2.66667	3.50314	0.63087	60
72	1201	3.00000	3.69333	0.12172	50
73	1201	3.33333	3.59649	0.08122	19
74	1201	3.66667	3.90476	0.02646	7
75	1202	1.66667	0.00000	0.00000	3
76	1202	2.00000	1.83333	2.73016	8
77	1202	2.33333	2.05926	2.93075	45
78	1202	2.66667	1.60131	2.65342	51
79	1202	3.00000	2.00758	2.43663	44
80	1202	3.33333	2.35000	1.43246	20
81	1202	3.66667	2.22222	0.14815	3
84	1203	1.33333	4.00000	.	1
85	1203	1.66667	3.77778	0.03704	3
86	1203	2.33333	3.37398	0.18997	41
87	1203	2.66667	3.32877	0.15584	73

88	1203	3.00000	3.34694	0.18500	49
89	1203	3.33333	3.21053	0.13840	19
90	1203	3.66667	4.00000	.	1
92	1204	1.66667	4.00000	0.00000	4
93	1204	2.00000	.	.	4
94	1204	2.33333	.	.	45
95	1204	2.66667	3.92593	0.04938	144
96	1204	3.00000	4.00000	.	94
97	1204	3.33333	.	.	50
98	1204	3.66667	.	.	33
99	1204	4.00000	.	.	11
100	1204	4.33333	.	.	6
101	1204	4.66667	.	.	1
103	1205	1.33333	3.00000	.	1
104	1205	1.66667	3.26984	0.05132	22
105	1205	2.00000	3.40580	0.06017	23
106	1205	2.33333	3.18333	0.05234	20
107	1205	2.66667	3.19608	0.04793	36
108	1205	3.00000	3.22989	0.04844	30
109	1205	3.33333	3.24561	0.03509	20
110	1205	3.66667	3.47619	0.14286	7
111	1205	4.00000	3.33333	0.00000	3
113	1224	1.33333	2.66667	.	1
114	1224	1.66667	2.80000	0.03333	5
115	1224	2.00000	3.33333	0.00000	3
116	1224	3.00000	2.66667	.	1
117	1224	3.33333	3.10000	0.12469	10
118	1224	3.66667	3.66667	0.08333	9
119	1224	4.00000	3.00000	.	1

Tasaisuus

Rivi	TMP	VTT	keskiarvo	varianssi	havaintoja
5	412	2	3.17391	0.24111	23
6	412	3	3.39759	0.41316	83
7	412	4	3.44737	0.41607	38
9	415	2	3.93750	0.06250	16
10	415	3	2.66667	2.78788	12
11	415	4	2.25000	3.64286	8
13	416	1	2.81250	0.29583	16
14	416	2	3.42857	0.75161	112
15	416	3	3.81553	0.62250	103
16	416	4	4.00000	0.34783	24
17	421	1	2.66667	0.33333	3
18	421	2	3.19048	0.69454	42
19	421	3	3.59322	0.27995	59
20	422	1	3.18182	0.36364	11
21	422	2	3.34375	0.23286	32
22	422	3	4.01695	0.15488	59
23	422	4	4.14815	0.13105	27
24	423	3	4.22222	0.44444	9
25	423	4	4.22222	0.44444	9
27	424	2	3.33333	0.26667	6
28	424	3	3.40000	0.33333	25
29	424	4	3.40000	0.30000	5
31	436	1	2.75000	0.28261	24
32	436	2	3.35484	0.27489	94
33	436	3	3.64151	0.27286	55
37	1201	1	3.00000	.	1
38	1201	2	3.14943	0.45416	98
39	1201	3	3.50495	0.25248	110
40	1201	4	3.58182	0.24781	61
41	1202	1	1.40000	1.80000	5
42	1202	2	1.92683	2.34026	82
43	1202	3	2.03797	3.37033	79
44	1202	4	3.00000	0.57143	8

47	1203	2	3.26190	0.24681	42
48	1203	3	3.21905	0.21117	105
49	1203	4	3.32500	0.22500	40
53	1204	2	3.00000	0.00000	96
54	1204	3	3.11111	0.11111	164
58	1205	1	2.00000	.	1
59	1205	2	2.74000	0.35959	50
60	1205	3	3.02597	0.28879	81
61	1205	4	3.27586	0.20690	30
63	1224	1	2.00000	0.00000	3
64	1224	2	2.18182	0.16364	11
65	1224	3	2.63636	0.25455	11
66	1224	4	2.80000	0.20000	5

Kiinteys

Rivi	TMP	VTT	keskiarvo	varianssi	havaintoja
6	412	1	3.25000	0.25000	4
7	412	2	3.46939	0.42092	49
8	412	3	3.72840	0.30031	81
9	412	4	4.00000	0.00000	10
11	415	1	0.00000	.	1
12	415	2	1.57143	3.95238	7
13	415	3	3.57143	1.18681	14
14	415	4	3.78571	0.48901	14
16	416	1	4.00000	0.40000	6
17	416	2	3.54945	0.36142	91
18	416	3	3.77143	0.37903	140
19	416	4	3.44444	0.37908	18
20	421	1	2.20000	0.31429	15
21	421	2	3.51351	0.31231	37
22	421	3	3.68000	0.26286	50
23	421	4	3.50000	0.50000	2
24	422	1	5.00000	.	1
25	422	2	3.90909	0.08658	22
26	422	3	4.00000	0.10811	75
27	422	4	4.20000	0.23448	30
29	423	2	3.87500	0.12500	8
30	423	3	3.70000	0.23333	10
32	424	1	3.00000	.	1
33	424	2	3.50000	0.57143	8
34	424	3	3.44444	0.25641	27
36	436	1	3.00000	0.00000	5
37	436	2	3.23684	0.23969	38
38	436	3	3.41071	0.28024	115
39	436	4	3.62500	0.25000	16
43	1201	2	3.45455	0.25078	104
44	1201	3	3.42063	0.46965	134
45	1201	4	3.86667	0.11954	30
46	1202	1	0.00000	.	1

47	1202	2	1.62222	3.19495	45
48	1202	3	2.66667	3.76812	93
49	1202	4	3.17143	3.26387	35
52	1203	2	3.23171	0.20491	82
53	1203	3	3.18889	0.19988	90
54	1203	4	3.13333	0.12381	15
58	1204	3	3.91667	0.08333	208
62	1205	2	3.00000	0.00000	22
63	1205	3	3.03030	0.02968	101
64	1205	4	3.05128	0.04993	40
65	1224	2	3.00000	0.00000	2
66	1224	3	2.75000	0.20455	12
67	1224	4	3.18750	0.16250	16

Liite G: Hoidon optimointi 1989 LP-tehtävänä

Hoitomallin formulointi lineaarisena ohjelmana ja optimiratkaisu.

Muuttujat:

KxTy, jossa K on kunto ja x kuntotila samoin kuin taulukossa 9/I sekä T on toimenpide ja $y = 1$ ei toimenpidettä, $y = 2$ höyläys.

Hämeen liikennemääräluokka I

NAME ALUE 1 / KVLL 1 : KESÄKUNNOSSAPITO 15.6.1990

ROWS

N 1

E 2

E 3

E 4

E 5

E 6

E 7

E 8

E 9

E 10

L 11

L 12

G 13

G 14

G 15

G 16

G 17

G 18

G 19

G 20

G 21

G 22

02.10.1990

G 23

G 24

G 25

G 26

G 27

G 28

COLUMNS

K1T1	1	2136.7552
K1T1	2	0.6328
K1T1	3	-0.2422
K1T1	5	-0.3203
K1T1	6	-0.0469
K1T1	8	-0.0156
K1T1	10	1.5156
K1T1	11	1.0000
K2T1	1	1730.0214
K2T1	2	-0.1573
K2T1	3	0.8708
K2T1	4	-0.0899
K2T1	5	-0.2472
K2T1	6	-0.2303
K2T1	7	-0.0562
K2T1	8	-0.0618
K2T1	9	-0.0112
K2T1	10	1.4438
K2T1	12	1.0000
K3T1	1	1431.6570
K3T1	2	-0.0120
K3T1	3	-0.2289
K3T1	4	1.0000
K3T1	5	-0.2169
K3T1	6	-0.3494
K3T1	7	-0.1084
K3T1	8	-0.0361
K3T1	9	-0.0241
K3T1	10	1.3253
K3T1	13	1.0000
K4T1	1	1746.4958

K4T1	2	-0.2579
K4T1	3	-0.1991
K4T1	4	-0.0362
K4T1	5	0.8281
K4T1	6	-0.1357
K4T1	7	-0.0271
K4T1	8	-0.1584
K4T1	9	-0.0136
K4T1	10	1.4706
K4T1	14	1.0000
K5T1	1	1536.0669
K5T1	2	-0.0731
K5T1	3	-0.1598
K5T1	4	-0.1142
K5T1	5	-0.2648
K5T1	6	0.9589
K5T1	7	-0.1507
K5T1	8	-0.0959
K5T1	9	-0.0868
K5T1	10	1.4338
K5T1	15	1.0000
K6T1	1	1454.1403
K6T1	2	-0.0172
K6T1	3	-0.0603
K6T1	4	-0.0603
K6T1	5	-0.0603
K6T1	6	-0.3621
K6T1	7	0.9569
K6T1	8	-0.1034
K6T1	9	-0.2328
K6T1	10	1.4138
K6T1	16	1.0000
K7T1	1	1202.5504
K7T1	2	-0.1644
K7T1	3	-0.1096
K7T1	5	-0.3425
K7T1	6	-0.1644
K7T1	7	-0.0411

K7T1	8	0.8630
K7T1	9	-0.0274
K7T1	10	1.2466
K7T1	17	1.0000
K8T1	1	1149.6279
K8T1	2	-0.0123
K8T1	3	-0.0988
K8T1	4	-0.0864
K8T1	5	-0.2469
K8T1	6	-0.1358
K8T1	7	-0.2222
K8T1	8	-0.1358
K8T1	9	0.9753
K8T1	10	1.2716
K8T1	18	1.0000
K9T1	1	1110.4680
K9T1	3	-0.1220
K9T1	4	-0.1707
K9T1	6	-0.2195
K9T1	7	-0.4146
K9T1	9	-0.0488
K9T1	10	1.2683
K9T1	19	1.0000
K1T2	1	3666.8100
K1T2	2	0.5625
K1T2	3	-0.0625
K1T2	4	-0.0625
K1T2	5	-0.1875
K1T2	6	-0.0625
K1T2	8	-0.1875
K1T2	10	2.0000
K1T2	20	1.0000
K2T2	1	3254.5719
K2T2	2	-0.2381
K2T2	3	0.6667
K2T2	4	-0.0476
K2T2	5	-0.2381
K2T2	6	-0.0476

K2T2	8	-0.0952
K2T2	10	2.0000
K2T2	21	1.0000
K3T2	1	3174.4572
K3T2	2	-0.2000
K3T2	3	-0.4000
K3T2	4	0.8000
K3T2	5	-0.2000
K3T2	10	2.0000
K3T2	22	1.0000
K4T2	1	3169.5507
K4T2	2	-0.0625
K4T2	3	-0.1875
K4T2	4	-0.1250
K4T2	5	0.6875
K4T2	6	-0.2187
K4T2	8	-0.0937
K4T2	10	2.0000
K4T2	23	1.0000
K5T2	1	2922.1553
K5T2	2	-0.1429
K5T2	3	-0.1429
K5T2	4	-0.0714
K5T2	6	0.5000
K5T2	8	-0.0714
K5T2	9	-0.0714
K5T2	10	2.0000
K5T2	24	1.0000
K6T2	1	2840.0205
K6T2	4	-0.5000
K6T2	6	-0.2500
K6T2	7	1.0000
K6T2	10	2.0000
K6T2	25	1.0000
K7T2	1	2993.4452
K7T2	3	-0.3750
K7T2	4	-0.0625
K7T2	5	-0.1875

K7T2	6	-0.1250
K7T2	7	-0.0625
K7T2	8	1.0000
K7T2	9	-0.0625
K7T2	10	2.0000
K7T2	26	1.0000
K8T2	1	2747.1992
K8T2	3	-0.5000
K8T2	7	-0.5000
K8T2	9	1.0000
K8T2	10	2.0000
K8T2	27	1.0000
K9T2	1	2664.0012
K9T2	3	-1.0000
K9T2	10	2.0000
K9T2	28	1.0000

RHS

RHS	10	1
RHS	11	0.1000
RHS	12	0.1500

ENDDATA

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 16

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

c1) 1194.80800

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
K1T1	.100000	.000000
K2T1	.111509	.000000
K3T1	.036291	.000000
K4T1	.160901	.000000
K5T1	.104353	.000000
K6T1	.045108	.000000
K7T1	.068317	.000000
K8T1	.026889	.000000

K9T1	.009875	.000000
K1T2	.028726	.000000

Liite H: Tilastot osuuksittaisesta aineistosta

N Obs	Variable	N	Minimum	Maximum	Mean	Std Dev
1441	KYLTTI	1441	4001.00	4171.00	4084.97	55.13
	OSUUS	1431	1.00	6.00	3.40	1.67
	S074	1302	0.00	21.00	12.59	3.62
	S125	1302	0.00	24.00	15.66	4.40
	S5	1298	0.00	47.70	30.61	8.24
	DUST	1232	0.27	0.64	0.42	0.06
	KKVLR	1232	1.00	43.00	12.17	8.27
	KEVATKAN	1261	16.00	168.00	68.15	36.61
	KANT2	1244	40.00	80.00	53.42	11.56
	KVLL	1266	1.00	3.00	1.87	0.76
	ALUE	1266	1.00	2.00	1.54	0.50
	LEVEYS	1266	1.00	2.00	1.01	0.11
	PEHMEET	1013	0.00	2000.00	81.88	221.17
	KANTAVA	1013	0.00	0.80	0.49	0.27
	HEITOT	1013	0.00	11.00	1.06	1.64
	PAINUMAT	1013	0.00	3.00	0.18	0.52
	MET	1222	0.00	100.00	58.56	38.85
	MINKK	1222	0.00	30.00	6.80	4.25
	TMP	1414	412.00	1224.00	841.50	389.88
	POISTUU	1414	0.00	1.00	0.11	0.32
	S885	1414	14.00	92.00	44.43	28.65
	S895	1414	27.00	61.00	47.14	9.09
	SADE88	1414	56.00	128.33	86.29	21.75
	SADE89	1414	56.33	98.67	76.32	12.55
	ALEVOIK	1253	40.00	72.00	54.21	6.17
	KKVLYHT	1253	31.00	757.00	198.97	140.74
	MAKISYYS	580	1.00	51.00	13.68	13.61
	KAARTEIS	580	9.00	366.00	140.32	73.21
	MINR	1255	168.00	948.00	314.56	61.15
	MAXR	1255	173.00	1270.00	372.84	90.25

HOYLAT	1414	0.00	7.00	2.63	1.57
SUOLAT	1414	0.00	3.00	0.42	0.70
EPTAS	1234	228.36	598.09	349.99	49.34
CONDIS	1234	2.00	3.88	3.17	0.30
RASKASPR	1220	0.01	0.61	0.07	0.05
SADERASK	1232	56.00	5360.67	1030.43	801.13
SADEYHT	1250	1736.00	76545.33	17091.50	13157.52

KYLTTI	2.5-3 km pituisen koetien numero. Hämeessä 4001-4071 ja Oulussa 4101-4170.
OSUUS	Kyltit jaettiin 500 m osuuksiin. OSUUS on numerointi kyltin alusta.
S074	Seulan 0.074 mm läpäisyprosentti [%]
S125	Seulan 0.125 mm läpäisyprosentti [%]
S5	Seulan 0.5 mm läpäisyprosentti [%]
DUST	Hienoainessuhde S074/S5
KKVLR	Kesän keskimääräinen raskaan liikenteen liikennemäärä [ajoneuvoa/vrk]
KEVATKAN	Tierekisterin kantavuustieto [MN/m ²]
KANT2	Tierekisterissä oleva kevätkantavuuskerroin (40, 60, 80)
KVLL	Kesän keskimääräisen liikenteen liikennemääräluokka (1,2,3)
ALUE	Häme on 1 ja Oulu on 2
LEVEYS	tie alle ja yli 6.5 m leveä
PEHMEET	pehmeikköjen määrä osuudella [m ²]
KANTAVA	tiemestareiden arvioima kevätkantavuuskerroin (0.4, 0.6, 0.8)
HEITOT	heittojen lukumäärä osuudella [kpl]
PAINUMAT	painumien lukumäärä osuudella [kpl]
MET	osuuden metsäisyysprosentti [%]
MINKK	osuudelta havaittu alin kerrospaksuus [cm]
TMP	tiemestaripiirin numero
POISTUU	kyltillä tehty muutoksia, josta syystä kyltti poistettiin koe-ohjelmasta
S885	toukokuun sademäärä 1988 [mm/kk]
S895	toukokuun sademäärä 1989 [mm/kk]
SADE88	kesäkuukausien keskimääräinen sademäärä 1988 [mm/kk]
SADE89	kesäkuukausien keskimääräinen sademäärä 1989 [mm/kk]
ALEVOIK	ajoraden leveys tierekisterissä [dm]
KKVLYHT	kesän keskimääräinen liikennemäärä [ajoneuvoa/vrk]
MAKISYYS	mäkisyys
KAARTEIS	kaarteisuus
MINR	osuudelta havaittu alin epätasaisuus [cm/km]
MAXR	osuudelta havaittu korkein epätasaisuus [cm/km]
HOYLAT	höyläyksien lukumäärä kesän aikana [kpl]
SUOLAT	lisäsuolausten lukumäärä [kpl]
EPTAS	kesän epätasaisuuskeskiarvo [cm/km]
CONDIS	kesän kuntoarvointien keskiarvo
RASKASPR	raskaan liikenteen osuus
SADERASK	keskimääräinen sademäärä * raskaanliikenteen määrä [mm*ajon.]

SADEYHT keskimääräinen sademäärä * liikennemäärä [mm*ajon.]

Liite I: Rakenneindeksi

Rakennendeksillä pyritään kuvaamaan rakenteen (pinnan alainen osa tiestä) tilaa sekä välillisesti tien ylläpidosta aiheutuvia kustannuksia. Indeksien on huomioitava tien vauriot ja kantavuus, kuivatusjärjestelmän kunto ja leveys sekä mahdollisesti myös tiestä riippumattomia tekijöitä kuten raskaan ajoneuvoliikenteen määrä. Indeksiksi on skaalattu siten, että paras arvo on 0 ja huonoin 100.

Ehdotus vaurioindeksiksi T

$$T = 100 * (1 - \exp(-C (a_{hi}H + a_{pi} P))).$$

H	heittojen ja painumien määrä	[kpl / km]
P	pehmeikköjen määrä	[m / km]
a_{hi}	heittojen painokerroin	
a_{pi}	pehmeikköjen painokerroin	

Kerroin C on funktio tien perusoiminaisuuksista (kantavuus, leveys, kuivatus ja raskaan liikenteen määrä). Näin ollen indeksi on vaurioindeksi.

Indeksi lasketaan 100 m pätkissä, kuten päällystettyjen teiden mittauksetkin. Tien luokitus saadaan tien luokiteltujen 100:n indeksilukujen jakaumasta.

Näin määriteltynä yksittäisen vaurion vaikutus indeksin arvoon vähenee vauriomäärän kasvaessa.

